

PolRess Reihe Nexus-Analysen

Nexus Ressourceneffizienz und Energiewende

Eine Analyse der Wechselwirkungen

Stefan Werland, Lisa Graaf, Klaus Jacob (FFU)

Stefan Bringezu, Bettina Bahn-Walkowiak (WI)

Martin Hirschnitz-Garbers (ecologic Institut)

Falk Schulze (Öko-Institut)

Mark Meyer (GWS)



Wuppertal Institut
für Klima, Umwelt, Energie
GmbH



Öko-Institut e.V.
Institut für angewandte Ökologie
Institute for Applied Ecology



PolRess – Ressourcenpolitik

Ein Projekt im Auftrag des Bundesumweltministeriums und des Umweltbundesamtes

Laufzeit 01/2012 – 05/2015

FKZ: 3711 93 103



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz,
Bau und Reaktorsicherheit

**Umwelt
Bundesamt**

Fachbegleitung UBA

Judit Kanthak

Umweltbundesamt

E-Mail: judit.kanthak@uba.de

Tel.: 0340 – 2103 – 2072

Ansprechpartner Projektteam

Dr. Klaus Jacob

Freie Universität Berlin

E-Mail: klaus.jacob@fu-berlin.de

Tel.: 030 – 838 54492

Projektpartner:



i | ö | w
INSTITUT FÜR ÖKOLOGISCHE
WIRTSCHAFTSFORSCHUNG



Die veröffentlichten Papiere sind Zwischen- bzw. Arbeitsergebnisse der Forschungsnehmer. Sie spiegeln nicht notwendig Positionen der Auftraggeber oder der Ressorts der Bundesregierung wider. Sie stellen Beiträge zur Weiterentwicklung der Debatte dar.

Zitationsweise: Werland, Stefan, Graaf, Lisa, Jacob, Klaus et al. (2014): Nexus Ressourceneffizienz und Energiewende. Eine Analyse der Wechselwirkungen. Berlin. www.ressourcenpolitik.de

Inhaltsverzeichnis

1.	Nexus Energiewende und Ressourceneffizienz: Einführung und Handlungsbedarf	1
2.	Systematisierung des Ressourcenbegriffs	1
3.	Methodik.....	3
4.	Auswirkungen der Energiewende auf die Ressourceneffizienz.....	5
4.1.	Ziel: Erhöhung der Energieeffizienz	6
4.1.1.	Erhöhung der Energieeffizienz im Gebäudebereich	6
4.1.2.	Energieverbrauchskennzeichnung bei Elektrogeräten	9
4.1.3.	Verringerung des Energieverbrauchs von Kraftfahrzeugen	9
4.1.4.	Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)	11
4.2.	Ziel: Ausbau der Erneuerbaren Energien und der Energieinfrastruktur.....	12
4.2.1.	Energiegewinnung aus Windenergie:.....	16
4.2.2.	Energiegewinnung aus Wasserkraft	17
4.2.3.	Energiegewinnung aus Biomasse:	18
4.2.4.	Energiegewinnung aus Photovoltaik:	20
4.3.	Ziel: Ausbau der Elektromobilität	21
4.4.	Zwischenfazit zu Kapitel 4:.....	23
5.	Auswirkungen der Ressourceneffizienz auf die Energiewende.....	24
5.1.	Ziel: Ressourceneffizienz in der Produktion steigern (inkl. ressourceneffiziente Produkte)	25
5.1.1.	Effizienzsteigerung in der Produktion.....	26
5.1.2.	Substitution bzw. der Einsatz neuer Werkstoffe zur Verbesserung der Ressourceneffizienz von Produkten	27
5.2.	Ziel: Ressourceneffizienten Konsum fördern.....	30
5.2.1.	Ansätze zur Erhöhung der Nutzungsintensität: Das Beispiel neue Nutzungskonzepte	31
5.2.2.	Ansätze zur Förderung effizienter Produkte: Das Beispiel ressourceneffiziente öffentliche Beschaffung.....	31
5.3.	Ziel: Ressourceneffiziente Abfall- und Kreislaufwirtschaft ausbauen	33
5.4.	Zwischenfazit zu Kapitel 5.....	38
6.	Fazit und weiterer Forschungsbedarf:.....	40
	Literatur	41

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Betrachtete Wirkungen zwischen den Ressourcentypen	3
Abbildung 2: Schematische Darstellung einer Wirkungskette	4
Abbildung 3: Metallnutzung in 14 Vattenfall-Wasserkraftwerken	18
Abbildung 4: Entwicklung der stofflichen und energetischen Holzverwendung in Mio. m3 1987 bis 2015	28
Abbildung 5: Darstellung der Wechselwirkungen zwischen den Ressourcentypen.....	50
Abbildung 6: Darstellung der Wechselwirkungen zwischen den Ressourcentypen – ausgehend von Baumineralien	50

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: TMR ausgewählter Energiesysteme (netto, ab Hochspannungsnetz) sowie des deutschen Strommixes (Hochspannungsnetz) (Quelle: Wuppertal Institut)	15
Tabelle 2: Materialeinsparpotential und Kosteneinsparung nach Branchen.....	25
Tabelle 3: Energieeinsparung durch Recycling bei unterschiedlichen Eisen- und Nichteisenmetallen (Bandbreiten)	35
Tabelle 4: Carbon Footprint and Savings in Kilotonnes of CO ₂	35

1. Nexus Energiewende und Ressourceneffizienz: Einführung und Handlungsbedarf

Das Ziel dieser Studie ist es, die Wechselwirkungen und die Kohärenz zweier zentraler umweltpolitischer Vorhaben der Bundesregierung – der Energiewende und der Erhöhung der Ressourceneffizienz (wie im Ressourceneffizienzprogramm ProgRess formuliert, nachfolgend auch: Ressourceneffizienzpolitik) – zu analysieren. Im Fokus dieses Arbeitspapiers steht die Frage, wie sich die Aktivitäten des einen Handlungsfelds auf das jeweils andere auswirken. In der öffentlichen Debatte werden vor allem mögliche Spannungen hervorgehoben, beispielsweise der Materialbedarf für den Ausbau der erneuerbaren Energien oder zusätzliche Baumaterialien, die für energieeffiziente Häuser notwendig sind. Energieeffiziente Produkte sind häufig aber auch ressourcenleichter. Schnittstellen zwischen Energiewende und Ressourceneffizienzpolitik können also sowohl Synergien als auch Zielkonflikte zwischen den Handlungsfeldern darstellen. Das Ziel dieser Studie ist es Handlungsbedarfe aufzuzeigen wo Priorisierungen erforderlich sind, Abwägungen getroffen werden müssen oder wechselseitige Verknüpfungen verstärkt werden können. Insofern liefert die Studie keine Gesamtbewertung sondern qualitative Aussagen darüber, wie sich die Ziele der beiden Politikfelder zueinander verhalten.

Die Studie untersucht, welche Auswirkungen die jeweiligen Politiken auf die Nutzung der unterschiedlichen natürlichen Ressourcen haben (vgl. Abb.1). Ausgehend von Zielen und Instrumenten des jeweiligen Handlungsfeldes werden deren Wirkungen systematisch auf folgende Ressourcengruppen untersucht:

- 1) die in ProgRess adressierten Materialien, das sind stofflich genutzte biotische und abiotische Rohstoffe inklusive stofflich genutzter fossiler Energieträger;
- 2) die Energieträger sowie
- 3) die Ressourcen Fläche/Boden, Atmosphäre, Biodiversität und Wasser.

Die Wirkungen auf die unter drittens genannten Ressourcen werden nur knapp skizziert – zu Fläche/Boden, Biodiversität sowie Wasser werden je eigene Nexus-Studien erstellt. Zur Beschreibung der Schnittstellen werden Kausalketten formuliert, die die Wirkungen von Instrumenten im jeweiligen Handlungsfeld auf die Nutzung der unterschiedlichen Ressourcentypen beschreiben. Die Validität der Kausalketten wird auf der Grundlage von wissenschaftlichen Studien untersucht.

Um die Schnittstellen systematisch zu erfassen, werden zunächst die in beiden Handlungsfeldern betroffenen Rohstoffe und Ressourcen dargestellt (Kapitel 2). In Kapitel 3 wird die Methodik der Wirkungskettenanalyse erläutert. In Kapitel 4 und 5 wird der Kenntnisstand zu den jeweiligen Wirkungen von Maßnahmen der Energiewende und der Ressourceneffizienzpolitik auf die unterschiedlichen Ressourcentypen aufbereitet (vgl. Abbildung 5, Anhang). Kapitel 0 enthält ein Fazit in dem die Ergebnisse der Nexus Analyse aus beiden Wirkrichtungen zusammengefasst sind.

2. Systematisierung des Ressourcenbegriffs

Die Schonung natürlicher Ressourcen, seien es stofflich und energetisch genutzte Rohstoffe, Boden und Fläche, Wasser, die Atmosphäre oder die Biodiversität Wasser, Böden, Land, Luft oder Rohstoffe ist ein

zentrales Motiv der deutschen, europäischen und internationalen Umweltpolitik. Das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung gebietet, dass Entnahmen dieser Ressourcen oder deren Nutzung als Senke im Rahmen ihrer Erneuerungs- bzw. Absorptionsraten erfolgen sollen. Die Energiewende und die im Ressourceneffizienzprogramm ProgRess formulierte Ressourceneffizienzpolitik sind in diesem Zusammenhang zentrale Politikfelder. Beide fokussieren aber auf unterschiedliche Materialien und Rohstoffe: (vgl. Abbildung 1)

Im Bereich Politik der Energiewende (vgl. Kap.4) stehen Energierohstoffe, d.h. die fossilen Energieträger Erdöl, Erdgas, Braun- und Steinkohle, Kernbrennstoffe wie Uran sowie Biomasse zur Gewinnung von Heizenergie, elektrischer Energie und Kraftstoffen im Mittelpunkt (BGR 2013b).

Weiterhin wird die Nutzung der folgenden Materialien durch energiepolitische Maßnahmen indirekt beeinflusst:

- Materialien, die zur energetischen Gebäudesanierung genutzt werden. Darunter fallen neben Baustoffen auch biotische Rohstoffe und fossile Energieträger aus Ausgangsmaterialien für Dämmstoffe;
- Materialien, die in Anlagen zur Energieerzeugung, -speicherung sowie in Übertragungsnetzen genutzt werden. Neben Baustoffen und Massenmetallen gehören auch viele der häufig als kritisch bezeichneten Rohstoffe zu dieser Gruppe.¹ Der Studie „Rohstoffe für Zukunftstechnologien“ zufolge sind im Bereich Energietechnik folgende Stoffe relevant: u.a. Gallium, Indium, Selen, Cadmium, Tellur, Silber, Silizium, Platin, Titan für die Photovoltaik; Neodym für Windkraftanlagen; Scandium, Yttrium, Zirkonium und Platin für Brennstoffzellen; Kobalt, Lithium, Mangan, Nickel für die Herstellung von Lithium-Ionen-Akkus; Kupfer für Elektromotoren sowie Siliziumoxid im Bereich Vakuumisolierung (Angerer/Marscheider-Weidemann/et al. 2009).

Bei der Betrachtung wird von den Ressourcen ausgegangen, die im Rahmen von ProgRess behandelt werden. Diese Gruppe umfasst stofflich genutzte abiotische und biotische Rohstoffe.² Unter diesem Begriffsverständnis sind folgende Materialien relevant:

- Erze und Metalle;
- Industriemineralien;
- Baumineralien;
- Biotische Rohstoffe (z.B. Holz, Pflanzenfasern etc.) , die stofflich genutzt werden;
- Fossile Rohstoffe, sofern sie stofflich genutzt werden.

Die Versorgungslage bei so genannten „kritischen Rohstoffen“, die unter anderem für Zukunftstechnologien von Bedeutung sind, stand in letzter Zeit im Mittelpunkt der öffentlichen Debatte (Jacob et al.

¹ Zur Definition und Verfügbarkeit „kritischer Rohstoffe“ wurde in den letzten Jahren eine Reihe von Studien publiziert, u.a. Angerer, 2009; Erdmann, Behrendt, & Feil, 2011; European Commission DG Enterprise and Industry, 2010.

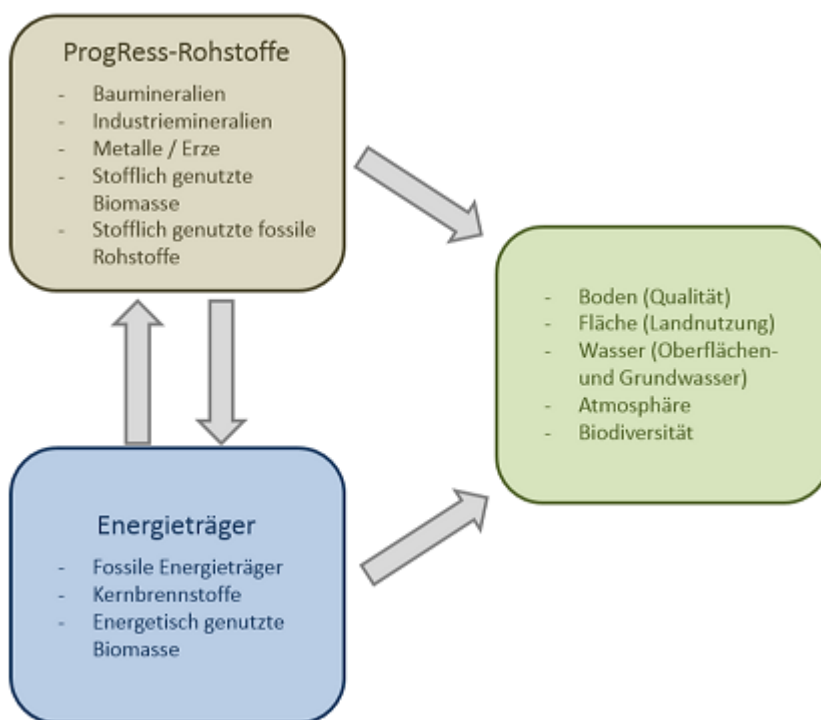
² In der Übersichtsgrafik in ProgRess werden stofflich genutzte fossile Energieträger nicht als Teil der in ProgRess behandelten Ressourcen ausgewiesen (Deutsche Bundesregierung, 2012a: 12).

2013; Werland 2012). Daher werden diese für die Untersuchung als eine eigene Rohstoffkategorie ausgewiesen, auch wenn sie den Kategorien Metalle/Erze bzw. Industriemineralien zugeordnet werden können.

Über die ProgRess-Rohstoffe hinaus werden zudem die Ressourcen Fläche, Böden, Wasser, Atmosphäre und Biodiversität jeweils in knapper Form betrachtet. Auch auf diese Ressourcen können sich durch die betrachteten Politiken mittelbar Zielkonflikte bzw. Synergien ergeben.

In der folgenden Abbildung werden die in der Analyse betrachteten Wirkungsrichtungen zwischen den Ressourcentypen dargestellt.

Abbildung 1: Betrachtete Wirkungen zwischen den Ressourcentypen



Quelle: eigene Darstellung

3. Methodik

Für die Analyse der Schnittstellen und der Kohärenz von Energie- und Ressourceneffizienzpolitik wird die Methode der Wirkungskettenanalyse verwendet (Ferretti et al. 2012; Wolff et al. 2013; Guske 2013). Dabei werden für beide Handlungsfelder zunächst die verfolgten Ziele und zentralen Instrumente zu deren Erreichung identifiziert. Diese Instrumente sollen Verhaltensänderungen unter den Zielgruppen auslösen, wie beispielsweise eine Veränderung in der Nachfrage nach Produkten, eine Änderung von Produktionsprozessen oder von Forschungstätigkeiten. Hier werden solche Verhaltensänderungen zentral gestellt, von denen es relevante Auswirkungen auf die Nutzung von Materialien geben könnte. Die (angenommenen oder beobachteten) Verhaltensänderungen können nun daraufhin untersucht werden, welche Auswirkungen sie auf die stoffliche und energetische Nutzung natürlicher Ressourcen haben (könnten) und inwiefern dadurch Ziele des anderen Handlungsfeldes berührt werden. Bei der Analyse

der Kohärenz wird somit die gesamte Wirkungskette von den Zielen über die Instrumente bis zu Verhaltensänderungen und deren Wirkungen auf natürliche Ressourcen betrachtet, um Zielkonflikte oder Synergien zu identifizieren.

Eine solche Betrachtung betrifft zunächst nur die direkten Effekte. Im Zusammenhang der hier betrachteten Ressourcen sind aber auch indirekte Wirkungen und Rückkopplungen denkbar oder sogar wahrscheinlich. So führt etwa die verstärkte Nachfrage nach Biomasse zur energetischen Nutzung auch zu einer Inanspruchnahme von Fläche, Wasser oder Düngemitteln und dies wiederum zu einem höheren Energieeinsatz für deren Bereitstellung. Eine in den letzten Jahren besonders prominent diskutierte indirekte Wirkungsbeziehung sind sogenannte Rebound Effekte. Hier werden Effizienzgewinne durch Verhaltensänderungen häufig (über-)kompensiert, beispielsweise wenn ein Gut oder eine Dienstleistung verstärkt nachgefragt wird, weil mit dem Effizienzgewinn auch Kostenvorteile verbunden sind oder wenn das durch Effizienzgewinne eingesparte Geld in anderen Konsumfeldern ausgegeben wird. In diesen Fällen kann es zu gleich hohen oder sogar höheren negativen Umweltwirkungen kommen, z.B. einer höheren Nachfrage nach Rohstoffen oder Energie, als dies ohne die Effizienzsteigerung der Fall gewesen wäre (Fronzel et al. 2012; Gillingham et al. 2013). Insbesondere der indirekte Rebound Effekt, der bei steigenden verfügbaren Einkommen vermutet wird, kann hier nicht analysiert werden, weil dafür die Datengrundlage fehlt.

Indirekte Wirkungsketten lassen sich in großer Zahl und mit langen Ketten konstruieren. Die Herausforderung besteht darin, aus der Vielzahl die relevanten Wirkungsbeziehungen zu identifizieren und vertieft zu untersuchen. Dies erfolgte in der vorliegenden Studie auf Basis einer umfassenden Literaturstudie und der Expertise der an der Studie beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Allerdings ist darauf hinzuweisen, dass es weitere indirekte Wirkungen geben kann, die bisher in der Literatur noch nicht als relevant thematisiert worden sind oder die erst dann sichtbar werden, wenn Skaleneffekte eintreten. In der Literaturstudie einbezogen werden neben *peer reviewed* Beiträgen und Daten von öffentlichen Institutionen auch sogenannte graue Literatur.

Abbildung 2: Schematische Darstellung einer Wirkungskette



Quelle: eigene Darstellung

Die Verknüpfung der Handlungsfelder Energiewende und Ressourceneffizienz erfolgt über die jeweils direkt adressierten und indirekt betroffenen Ressourcen. Abbildung 5 im Anhang beschreibt in einer vereinfachten Weise die Wirkungszusammenhänge zwischen diesen Kategorien (ebenfalls im Anhang: nach Ressourcentypen aufgeschlüsselte Übersichten). Die Ausprägungen der Wirkungszusammenhänge und die zugrunde liegenden Verhaltensweisen (Prozesse) werden in den folgenden Kapiteln spezifiziert. Dabei werden die Wirkungen qualitativ beschrieben. In den Fällen in denen konkrete, mit Zahlen unterlegte Beispiele oder wissenschaftliche Untersuchungen vorhanden sind werden diese angeführt. Im

Rahmen dieses Nexus-Papiers konnten allerdings keine primären Erhebungen durchgeführt werden, sondern nur vorhandene Studien sekundär ausgewertet werden.

4. Auswirkungen der Energiewende auf die Ressourceneffizienz

Die Bundesregierung hat am 28. September 2010 ein Energiekonzept beschlossen, in dem die Ziele der deutschen Energie- und Klimapolitik festgelegt werden. Demzufolge sollen die Treibhausgasemissionen bis 2020 um 40 Prozent, bis 2030 um 55 Prozent und bis 2050 um 80 bis 95 Prozent gegenüber dem Basisjahr 1990 gesenkt werden. Zudem soll laut Bundestagsbeschluss vom 30. Juni 2011 bis zum Jahr 2022 der Ausstieg aus der Atomkraftnutzung vollzogen sein. Als Ziele der Energiewende werden im *ersten Monitoringbericht Energie der Zukunft* die folgenden aufgezählt:

- die Verringerung von Treibhausgasemissionen,
- die Erhöhung der Energieeffizienz,
- die Verringerung des Energiebedarfs bei Gebäuden,
- die Verringerung des Energiebedarfs im Verkehrsbereich und Erhöhung der Anzahl der Elektrofahrzeuge,
- die Erhöhung des Anteils der Erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch und am Endenergieverbrauch (BMW/BMU 2011)

Um diese Ziele zu erreichen soll zum einen der Anteil der erneuerbaren Energien an der Energieversorgung ausgebaut werden. Für den Anteil am Bruttoendenergieverbrauch sind bis zum Jahr 2050 60 Prozent vorgesehen³, der Anteil am Bruttostromverbrauch soll bis 2050 80 Prozent betragen.⁴ Zu den für Deutschland relevanten erneuerbaren Energiequellen zählen Windenergie, Wasserkraft, Solarenergie (v.a. Photovoltaik und Solarthermie), Biomasse sowie Geothermie und Umweltwärme (BMU 2013).

Zum anderen enthält das Energiekonzept Effizienzziele für die Senkung des Primärenergie⁵ und des Stromverbrauchs.⁶ Gleichzeitig soll sich die Energieproduktivität bezogen auf den Endenergieverbrauch jährlich um 2,1 Prozent verbessern. Spezifische Effizienzziele werden für den Gebäudesektor formuliert⁷. Weitere Komponenten der Energiewende sind der Ausbau des Stromnetzes und Energiespeicherkapazitäten, die energetische Sanierung von Gebäuden und die Förderung der Elektromobilität.

Die Energiewende führt absehbar zu einer Verschiebung der Ressourcenbasis der Energiegewinnung von fossilen Energieträgern und Uran hin zur Nutzung von Wasserkraft, Wind- und Solarenergie sowie von

³ Zwischenziele sind für die Jahre 2020 (18%), 2030 (30%) und 2040 (45%) formuliert.

⁴ Bis 2020 35 Prozent, bis 2030 50 Prozent und bis 2040 65 Prozent.

⁵ Bis 2020 um 20 Prozent und bis 2050 um 50 Prozent gegenüber 2008.

⁶ Bis 2020 um 10 Prozent und bis 2050 um 25 Prozent gegenüber 2008.

⁷ Verminderung des Wärmebedarfs bis 2020 um 20 Prozent des Primärenergiebedarfs bis 2050 um 80 Prozent. Nahezu klimaneutraler Gebäudebestand bis 2050.

Biomasse. Ausgehend von den Zielen und Maßnahmen werden im Folgenden deren Implikationen für die Rohstoff- und Ressourcennutzung systematisch beschrieben.

4.1. Ziel: Erhöhung der Energieeffizienz

Ziel des Ansatzes ‚Erhöhung der Energieeffizienz‘ ist es, die Nachfrage nach (fossilen) Energieträgern und so den Ausstoß von Treibhausgasen zu verringern.

4.1.1. Erhöhung der Energieeffizienz im Gebäudebereich

Rund 40 Prozent des deutschen Energieverbrauchs entfallen auf den Bereich Bauen und Wohnen (Rohn et al. 2010, 24). Zu den Instrumenten, die auf eine Erhöhung der Energieeffizienz im Gebäudebereich abzielen zählen neben informatorischen Instrumenten wie beispielsweise Energieausweise oder Energieberatungen auch Mindeststandards sowie Förderprogramme zur energetischen Gebäudesanierung. In diesem Rahmen werden zinsgünstige Kredite und andere finanzielle Förderungen an Hauseigentümer, Kommunen, kommunale Unternehmen, Wohnungsunternehmen und -genossenschaften sowie Eigentümer-Standortgemeinschaften bereitgestellt. Die Finanzmittel des CO₂-Gebäudesanierungsprogramms aus dem Energie- und Klimafonds umfassen für den Zeitraum von 2012 bis 2014 1,5 Mrd. EUR (BMVI 2014). Damit gehört die energetische Gebäudesanierung zur zweitgrößten Finanzhilfe des Bundes (nach den Zuschüssen für den Absatz deutscher Steinkohle) (BMF 2012, 24). Entsprechend der EU-Richtlinie 2010/31/EU vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden müssen Neubauten bis 2021 dem Niedrigstenergiegebäude-Standard entsprechen (öffentliche Neubauten bereits bis 2019). Zudem sollen informatorische Instrumente wie der Energieausweis für Gebäude gestärkt werden.

Auswirkungen der Instrumente auf Energieträger und ProgRess-Rohstoffe

Die Förderung der energetischen Gebäudesanierung führt absehbar zu einer stärkeren Nachfrage nach Dämmmaterial. Zur Dämmung können organische und anorganische Faserdämmstoffe oder synthetische Schaumstoffe genutzt werden. Nach Angaben des Bauinformationssystems WECOBIS kann der Bedarf an Dämmstoffen aufgrund der hohen Nachfrage nicht alleine aus nachwachsenden Rohstoffen gedeckt werden (WECOBIS n.d.). Anorganische Faserdämmstoffe werden vorwiegend aus Baumineralien (Mineralwolle) oder einer Mischung von Altglas und Baumineralien (Glaswolle) hergestellt. Organische Faserdämmstoffe bestehen aus Biomasse, d.h. tierischen und pflanzlichen Fasern wie Schafwolle, Holz-, Kokos-, oder Hanffasern oder aus Recyclingmaterial wie Zellulose aus Altpapier (Hanke et al. 2010, 64). Synthetische Schaumstoffe sind in der Regel Polystyrol-Hartschäume, die auf Erdöl basieren. Sie sind besonders geeignet für die Dämmung von Außenfassaden. Durch die Verwendung von Flammschutz-Additiven und Verunreinigungen sind Polystyrol-Hartschäume aus dem Baubereich schwer recycelbar (Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV n.d.). Eine Alternative zu den herkömmlichen Dämmstoffen ist Vakuumisolation, die einen höheren Wirkungsgrad aufweist, bislang aber nicht weit verbreitet ist. Relevante Rohstoffe sind je nach Kernmaterial Siliziumoxid, Siliziumkarbid oder Erdöl (Angerer/Erdmann/et al. 2009).

Den Angaben eines Positionspapiers der Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg und mehrerer Forschungsinstitute zufolge (Kienzeln et al. 2014) weisen typische Wände eines Altbaus U-

Werte⁸ von 1,4 bis 1,8 W/m²K auf. Bei einer Außentemperatur von Null Grad Celsius müsse eine Wärmeleistung von 30 bis 40 Watt pro Quadratmeter Außenwandfläche aufgebracht werden, um eine Innentemperatur von 20 Grad Celsius zu halten.⁹ Demgegenüber würden gedämmte Wände einen U-Wert von 0,1 bis 0,3 W/m²K aufweisen; damit geben sie fünf- bis zehnmal weniger Wärmeenergie an die äußere Umgebung ab (Kienzeln et al. 2014)s. Sofern durch die Maßnahmen eine geringere Nachfrage nach Raumwärme erreicht wird, kommt es absehbar zu einem verringerten Verbrauch von Energieträgern. Dies sind vorwiegend Erdöl und Erdgas, je nach Heizungstyp können aber auch Kernbrennstoffe (Elektrizität) oder Biomasse betroffen sein.

Im Rahmen des MaRess-Projekts wurden unterschiedliche Szenarien im Bedarfsfeld Warmer Wohnraum untersucht. Als Dämmstoffe wurden Polystyrol (XPS) und Zellulose angenommen. Demnach erfordere der Einsatz von Dämmmaterialien zunächst einen erhöhten Aufwand an biotischen und abiotischen Rohstoffen, der sich bei der Betrachtung des gesamten Primärmaterialaufwandes durch die eingesparten fossilen Energieträger zum Heizen jedoch amortisiere. Dabei seien die Auswirkungen von XPS- und Zellulose-Dämmung auf die Materialintensität vergleichbar (Hanke et al. 2010, 105). Einer Studie des VDI-ZRE zufolge werden für die Raumheizung eines Einfamilienhauses mit 120 m² Grundfläche und durchschnittlichen Wärmedämmeigenschaften jährlich rund ca. 1600 Liter Heizöl verheizt. Um ein solches Haus mit einer Fassadendämmung von 25 cm Dicke aus expandiertem Polystyrol zu versehen würden 40 Prozent dieser Erdölmenge benötigt. Dieser Aufwand würde durch die Einsparungen bei der Heizenergie bei einer angenommenen Nutzungsdauer von vierzig Jahren bei weitem überkompensiert. Je nach Dicke der Dämmschicht könne eine Amortisierung bereits innerhalb eines Jahres erfolgen (Becker 2014, 9).

Ein aus ressourcenpolitischer Perspektive kritischer Aspekt bei der Nutzung von Dämmmaterialien ist deren Recyclingfähigkeit und der Entsorgungsaufwand. Insgesamt bestehen bei den aktuell zur Verfügung stehenden Entsorgungswegen große, derzeit ungenutzte Effizienzpotentiale für ein verbessertes Recycling und die Kreislaufführung der genutzten Materialien (Becker 2014): Für mineralische Dämmstoffe wie Glas, Stein- und Mineralwolle, Porenbeton und Schaumglasplatten bietet sich derzeit nur die Deponierung als Entsorgungsoption an; synthetische Dämmstoffen werden in der Regel thermisch verwertet (Becker 2014). Ein Recycling ist zwar technisch möglich, jedoch sind die Dämmstoffe in der Regel mit Bauschutt verunreinigt und dadurch zum Recycling ungeeignet. Zudem werden bei synthetischen Wärmedämmstoffen häufig halogenierte oder teilhalogenierte Treibmittel genutzt, so dass nach Angaben des Forum Nachhaltiges Bauen als Entsorgungsweg ausschließlich die kontrollierte Verbrennung infrage kommt (Kolb 2014). Bei einigen synthetischen Dämmstoffen wie EPS müssen die Rückstände der Verbrennung als Sonderabfall deponiert werden. Bei der Verbrennung lasse sich ca. 40 % der eingesetz-

⁸ Der U-Wert (auch: Wärmedurchgangskoeffizient) ist ein Maß für die Wärmeleitfähigkeit eines Bauelements. Er gibt an, welche Heizleistung (in W/(m²K)) erbracht werden muss, um eine Temperaturdifferenz von 1 Kelvin zwischen Innenraum und Umgebung aufrecht zu erhalten.

⁹ Wird eine Jahresdurchschnittstemperatur in Deutschland von ca. 10 Grad Celsius zugrunde gelegt halbiert sich rechnerisch dieser Energieaufwand.

ten Energie als Heizwert zurückgewinnen (Kolb 2014). Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen können entweder thermisch verwertet oder möglicherweise auch kompostiert werden (Becker 2014). Dies setzt jedoch eine konsequente sortenreine Erfassung der biotischen Stoffe voraus.

Auswirkungen der Instrumente auf die Ressourcen Boden/Fläche, Atmosphäre, Wasser, Biodiversität

Sofern es zu einer verringerten Nachfrage nach Energierohstoffen und Biomasse zur Wärmeerzeugung kommt, wäre zunächst – trotz des möglicherweise steigenden Einsatzes von biotischen Dämmstoffen – eine positive Wirkung auf die Ressourcen Boden/Fläche, Atmosphäre, Wasser und Biodiversität zu erwarten. Allerdings wird auch auf mögliche Gefährdungen für die Umweltmedien hingewiesen, wenn Bestandteile der Dämmsysteme ausgewaschen werden und in Boden und Grundwasser gelangen.

- In synthetischen Dämmmaterialien wird häufig das bromierte Flammschutzmittel Hexabromcyclododecan (HBCD) verwendet, das toxisch auf Gewässerorganismen wirkt (Umweltbundesamt 2008). Die Herstellung und Anwendung von HBCD wurde im Mai 2013 im Rahmen des „Stockholmer Übereinkommens über persistente organische Schadstoffe“ mit einer Übergangsfrist bis 2014 verboten. Für den Einsatz in Wärmedämmplatten gelten Ausnahmeregeln bis 2015 (Umweltbundesamt 2013). Der Industrieverband Hartschaum rät seinen Mitgliedsunternehmen, HBCD durch das Flammschutzmittel „Polymer-FR“ zu ersetzen. Dies ist ein bromiertes Polymer, dass nach derzeitigen Informationen nicht die problematischen Umwelteigenschaften von HBCD besitzt und demnach weiterhin als Flammschutzmittel zulässig ist (Umweltbundesamt 2014, 7; Industrieverband Hartschaum 2014).
- Gedämmte Fassaden trocknen weniger schnell ab, wodurch es zu einer verstärkten Algenbildung an der Fassade kommen kann. Daher würden dem Putz oder der Wandfarbe häufig Biozide beigemischt, die den Algenbefall verhindern sollen. Diese Wirkstoffe würden mit der Zeit ausgewaschen und könnten so ins Grundwasser gelangen (Sprengard et al. 2012, 220).

Für die Nutzung der Erdatmosphäre als Treibhausgas-Senke ergab die Modellierung im MaRes-Projekt, „dass zusätzliche Aufwendungen für Dämmstoffe sowohl ressourcen- als auch emissionsseitig in fast allen Umweltwirkungskategorien durch erhebliche Einsparungen bei der Gebäudebeheizung überkompensiert werden. Im Wesentlichen sind keine Trade-offs erkennbar und der prozentuale Beitrag der Dämmstoffe an den Umweltwirkungsindikatoren ist gering“ (Hanke et al. 2010, 105).¹⁰ Allerdings könne es durch die Nutzung von Fluorkohlenwasserstoffen als Treibmittel bei einigen XPS-Dämmstoffen zu einem „erheblichen Trade-off“ bezüglich der Wirkungskategorie „Stratosphärischer Ozonabbau“ sowie zu einer „erkennbaren, jedoch nicht so deutlichen Wirkung auf das Treibhaus-Potenzial“ der energetischen Gebäudesanierung kommen (Hanke et al. 2010, 105).

¹⁰ Im anspruchsvollsten Szenario „MaRes Leit-Plus“ wurde eine Einsparung des Wärmebedarfs durch verbesserte Dämmung von 23.951 PJ von 2005 bis 2050 modelliert. Dabei wurden – mit beiden Dämmmaterialien – über 6 Mrd. t abiotische Primärmaterialien eingespart und ca. 1 Mrd. t biotische.

4.1.2. Energieverbrauchskennzeichnung bei Elektrogeräten

Durch eine Energieverbrauchskennzeichnung sollen Konsumenten dazu angeregt werden, möglichst energieeffiziente Produkte zu beschaffen.

Auswirkungen der Instrumente auf Energieträger und ProgRess-Rohstoffe

Durch die Nutzung energieeffizienterer Produkte kann tendenziell von einer Verringerung der Nachfrage nach Energieträgern (fossile Rohstoffe, Biomasse) ausgegangen werden. Andererseits könnte ein beschleunigter Austausch von Elektrogeräten aus energiepolitischen Erwägungen auch zu einer erhöhten Materialnutzung bei der Herstellung der Neuprodukte führen und so dem ressourcenpolitischen Ansatz der Verlängerung von Produktnutzungszeiten entgegenwirken. Der Effekt auf den Gesamtmaterialeinsatz hängt von einer Vielzahl von Variablen ab (z.B. Materialintensität und Energieverbrauch der Produkte, Nutzungsintensität, Verbleib und Entsorgungswege der Altprodukte, genutzte Recyclingtechnologien), so dass hier keine generellen Aussagen getroffen werden können. Gelegentlich wird die Befürchtung geäußert, dass Rebound-Effekte die Nachfrageminderung nach Energieträgern relativieren oder sogar aufheben. In empirischen Untersuchungen wird aber auch gezeigt, dass die Effizienzgewinne die Rebound-Effekte übersteigen (Gillingham et al. 2013).

Auswirkungen der Instrumente auf die Ressourcen Boden/Fläche, Atmosphäre, Wasser, Biodiversität

Die direkten Auswirkungen einer Energieverbrauchskennzeichnung bei Elektrogeräten auf die Ressourcen Boden/Fläche, Atmosphäre, Wasser und Biodiversität sind unklar. Sofern es zu einer verringerten Nachfrage nach Energierohstoffen und Biomasse kommt, wäre auch eine entlastende Wirkung auf die Ressourcen Boden/Fläche, Atmosphäre, Wasser und Biodiversität zu erwarten.

4.1.3. Verringerung des Energieverbrauchs von Kraftfahrzeugen

Auf europäischer Ebene bestehen für alle neuen motorisierten Fahrzeuge Vorgaben zur Begrenzung der CO₂-Emissionen. Für PKW betragen diese (im Flottendurchschnitt der Hersteller) ab 2015 120 g/km und ab 2020 95g/km, für leichte Nutzfahrzeuge 175 g/km bzw. 147 g/km. Zudem wurden mit dem Energieverbrauchskennzeichnungsgesetz (EnVKG) im Jahr 2012 Automobilhersteller und -importeure dazu verpflichtet, Angaben über Energieverbrauch und CO₂-Emissionen bereitzustellen.

Neben der Verbesserungen der Effizienz des Antriebs und der Aufnahme von Hybrid- und Elektromobilen in das Angebot (vgl. Kap. 4.3 Elektromobilität) ist Leichtbau eine Schlüsselstrategie zur Verbindung von Energie- und Materialeffizienz im Automobilbau.

Auswirkungen der Instrumente auf Energieträger und ProgRess-Rohstoffe

Ansätze zum Leichtbau finden sich in der Nutzung neuer Werkstoffe, Fertigungsverfahren und Bauweisen (Friedrich/Krishnamoorthy 2013, 3). Diese stehen in Wechselwirkungen zueinander, beispielsweise wenn Fertigungsverfahren besondere Werkstoffqualitäten erfordern.

Eine Leichtbaustrategie ist, den genutzten Stahl durch andere Werkstoffe wie faserverstärkte Kunststoffe (v.a. erdölbasiert, zunehmend auch auf Basis nachwachsender Rohstoffe), Aluminium, Magnesium oder Titan zu ersetzen. Weil die Gewinnung und Herstellung von Leichtbaumaterialien häufig wesentlich

energieintensiver ist als die von Stahl, kann deren Nutzung zunächst zu einer erhöhten Nachfrage nach Energieträgern führen. Dieser erhöhte Energieeinsatz kompensiert sich i.d.R. in der Nutzungsphase. Angaben von Audi zufolge wird die Energiebilanz je nach Modell bei 20.000 bis 60.000 Kilometern Laufleistung positiv (Trechow/Pester 2011); van de Sand et al. kommen zu der Einschätzung, dass sich der energetische Mehraufwand bei der Herstellung (bei einem gleichen Anteil von Primär- und Sekundäraluminium) ab rund 75.000km Laufleistung egalisiert (van de Sand et al. 2007, 40).

Während Leichtmetalle relativ problemlos recycelt werden können (wenn auch häufig mit einem Qualitätsverlust), ist das Recycling von Carbonfasern energieintensiv und noch in einer frühen Entwicklungsphase (Eickenbusch/Krauss 2014, 39).

Eine andere Möglichkeit des Leichtbaus ist es, konventionelle Werkstoffe, i.d.R. Stahl, in speziellen Fertigungsverfahren herzustellen. So kann durch die Nutzung hochfester Stähle die benötigte Materialmenge reduziert werden (Ellenrieder et al. 2013, 57). Andere Beispiele sind das ‚Tailored Tempering‘ oder die Nutzung von ‚Tailored Blanks‘, bei denen Materialstärken von Bauteilen je nach Anforderung an Belastbarkeit und Steifigkeit stellenweise variieren (VDI ZRE 2014). Wegen mit den Fertigungsverfahren verbundenen hohen Qualitätsanforderungen an die Ausgangsmaterialien werden häufig primäre Rohstoffe als Ausgangsmaterial verwendet. Sekundärmaterial ist aufgrund der in Schrotten vorhandenen Verunreinigungen in vielen Fällen ungeeignet (Angerer/Erdmann/et al. 2009, 28).

Insgesamt schätzen Angerer et al., dass Leichtbau zu einer Abnahme des Stahlbedarfs für Karosseriebleche pro Fahrzeug führen wird. Durch die steigenden Fahrzeugproduktionszahlen (geschätzt: +58 Prozent im Zeitraum 2006 bis 2030) sei dennoch mit einem „moderaten“ Anstieg des Stahlbedarfs um 26 Prozent zu rechnen (Angerer/Erdmann/et al. 2009, 31).

Auswirkungen der Instrumente auf die Ressourcen Boden/Fläche, Atmosphäre, Wasser, Biodiversität

Einige Materialien, die im Leichtbau genutzt werden, weisen einen höheren globalen Materialaufwand (Total Material Requirement, TMR)¹¹ auf als konventionelle Werkstoffe. Für die Herstellung eines Kilogramms Primäraluminium werden 37 kg abiotische Rohstoffe und circa 1.000 Liter Wasser benötigt, für Stahl aus Erzen werden pro Kilogramm je nach Stahlsorte circa 8 bis 10kg abiotische Rohstoffe und 55 bis 82 Liter Wasser genutzt (Wuppertal Institut für Klima Umwelt Energie 2014). Das kann dazu führen, dass leichtere und damit energieeffizientere Fahrzeuge zunächst einen höheren ökologischen Rucksack aufweisen als konventionelle Fahrzeuge. Dies betrifft v.a. die Nutzung von Fläche und Wasser, aber auch die Emission von Treibhausgasen in die Atmosphäre. So ist beispielsweise die Herstellung von Aluminium wesentlich Energie- und damit CO₂-intensiver als die von Stahl. Dieses Verhältnis kehrt sich jedoch um, je stärker die Nutzungsphase, d.h. der Verbrauch fossiler Energieträger im Betrieb, in die Kalkulation einbezogen wird (van de Sand et al. 2007, 60). Ob eine Karosserie aus Aluminium im Vergleich zur konventionellen aus Stahl in Produktion und Nutzungsphase netto stoffliche Ressourcen einspart, hängt

¹¹ Der TMR umfasst die genutzte und ungenutzte Entnahme im In- und Ausland, also auch Abraum und Bergematerial aus der Rohstoffgewinnung.

wesentlich davon ab, ob das Aluminium überwiegend aus Recycling stammt (rezykliertes Aluminium weist einen deutlich geringeren Ressourcenrucksack auf als solches aus Bauxit). Hier besteht jedoch das Problem, dass rezyklierte Aluminium-Bauteile im Wesentlichen Gussteile sind, die hauptsächlich nur für den Motorblock in Frage kommen (Angerer/Erdmann/et al. 2009, 28). Entscheidende Einsparungen lassen sich demnach vornehmlich durch ein verändertes Autodesign erreichen (van de Sand et al. 2007, 60).

4.1.4. Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)

Unter Kraft-Wärme Kopplung versteht man die gleichzeitige Gewinnung von Nutz- und/oder Prozesswärme und elektrischem Strom. Dadurch sollen die ungenutzte Abgabe von Wärmeenergie vermieden und Energieträger möglichst effizient genutzt werden.

Auswirkungen der Instrumente auf Energieträger und ProgRess-Rohstoffe

Bei der Nutzung von KWK kann von einer verringerten Nachfrage nach Energierohstoffen und nach Biomasse für die energetische Nutzung ausgegangen werden. Für die Errichtung der nötigen Infrastruktur (Wärmeleitungsnetz, Wärmespeicher) ist ein zusätzlicher Materialaufwand, vor allem für Metalle zu erwarten. Detaillierte Studien, die den Materialaufwand für KWK-Anlagen abschätzen liegen bislang nicht vor.

Auswirkungen der Instrumente auf die Ressourcen Boden/Fläche, Atmosphäre, Wasser, Biodiversität

Sofern der Ausbau der KWK zu einer Verringerung der Nachfrage nach energetisch genutzten Rohstoffen und zu einer Verminderung von CO₂-Emissionen der Energieerzeugung führt, sind entlastende Auswirkungen auf die Ressourcen Boden/Fläche, Atmosphäre, Wasser und Biodiversität zu erwarten.

Maßnahmen zur Förderung der Energieeffizienz und ihre *direkte* Wirkung auf die Ressourcentypen

Anmerkung: die Tabelle dient dem Überblick – die darin enthaltenen Pfeile stellen Tendenzen dar; tatsächlich sind die Wirkungen in hohem Maße von Bedingungen abhängig und die Pfeile für Einzelfälle daher zu hinterfragen.

Wirkung auf die Nutzung von:	Massenmetalle (primär)	„kritische“ Rohstoffe	Bau-mineralien	Industrie-mineralien	Energieträger (fossile und Kernbrennst.)	Biomasse		Wasser	Fläche Boden	Biodiv	Atmosphäre
Maßnahme						Stoffl.	Energ.				
Energetische Gebäudesanierung			↑		↓ ^{*)}	↑ ^{**)}	↓				↓
Energieverbrauchs-kennzeichnung bei Elektrogeräten					↓		↓				↓
Verringerung des Energieverbrauchs bei Kraftfahrzeugen	↓ ^{***)} ↑				↓		↓ ^{****)}				↓
Ausbau der KWK	↑		↑		↓		↓				↓

*) Höhe des Effekts je nach verwendetem Dämmstoff

**) beim Einsatz biotischer Dämmstoffe

***)) für einige Leichtbau-Maßnahmen können nur Metalle aus Erzen genutzt werden, Sekundärmetalle sind nicht geeignet.

****)) sofern Biokraftstoffe genutzt werden

4.2. Ziel: Ausbau der Erneuerbaren Energien und der Energieinfrastruktur

Ziel ist der Umbau der Rohstoffbasis der Energieversorgung von fossilen Energieträgern und Uran zur Nutzung erneuerbarer Energien. Unter den Begriff erneuerbare Energien werden Wind- und Sonnenenergie, Geothermie, Wasserkraft und die Energieerzeugung aus Biomasse gefasst. Der Ausbau erneuerbarer Energien ist ein zentraler Baustein der Energiewende. Wichtige Ansätze auf nationaler Ebene sind das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EE-WärmeG), das Biokraftstoffquotengesetz¹² und Förderinstrumente wie das Marktanzreizprogramm (MAP). Maßnahmen zur Förderung der erneuerbaren Energien führen absehbar zu einem Wandel der Rohstoffbasis der Energieversorgung und des Rohstoffbedarfs für Energietechnologien. Grundlegend geht es um die Substitution von Energierohstoffen durch Biomasse sowie durch Sonnen-, Wind-, und Wasserkraft. Weil Geothermie, Sonnenenergie und die anderen strömenden Ressourcen zur Energiegewinnung genutzt, aber nicht verbraucht werden, wird kein Effekt auf diese angenommen. Beim Ausbau der Erneuerbaren Energien wird hingegen häufig die entscheidende Rolle von so genannten kritischen Rohstoffen betont.

¹² Gesetz zur Einführung einer Biokraftstoffquote durch Änderung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes und zur Änderung energie- und stromsteuerrechtlicher Vorschriften.

Bei der Aufarbeitung des Forschungsstandes ist insgesamt auffällig, dass zwar häufig Informationen über den Rohstoff- und Ressourcenbedarf von Technologien der erneuerbaren Energien verfügbar sind, diese aber nur selten ins Verhältnis zu den Substitutionspotentialen für fossile oder nukleare Energieträger gesetzt werden. Beispielsweise wird in der öffentlichen Diskussion häufig die gesteigerte Nachfrage nach Werkstoffen für Windkraftanlagen betont, ohne dass thematisiert würde, inwieweit dadurch konventionelle Kraftwerke und die für deren Betrieb notwendige Infrastruktur eingespart werden können und welche Effekte dies auf die Rohstoffnachfrage hat. Dadurch entsteht in der öffentlichen Debatte der Eindruck, dass die Nutzung erneuerbarer Energien automatisch zu einem Mehrverbrauch an Rohstoffen führt. Um die Veränderung des Rohstoffbedarfs durch Erneuerbare Energien besser charakterisieren zu können besteht hier weiterer Forschungsbedarf. Ein Vergleich der stofflichen Materialnutzung von konventioneller Energieerzeugung und der Nutzung erneuerbaren Energien ist nicht zuletzt deshalb problematisch, weil es keine Angaben darüber gibt, inwieweit Windkraft die Stromerzeugung in konventionellen Kraftwerken – oder sogar die Kraftwerke selbst – ersetzt, inwieweit die Energiewende einen Umbau des bestehenden Kraftwerksparks erfordert und welche Netto-Effekte sich daraus für die (stoffliche) Rohstoffinanspruchnahme der erneuerbaren Energien ergeben. Das Potential, konventionelle Kraftwerke zu ersetzen, hängt vor allem von der Grundlastfähigkeit der erneuerbaren Energieträger ab. Dies schließt die Frage mit ein, inwieweit die Nachfrage nach Energie flexibel gestaltet werden kann und wie die Übertragungsmöglichkeiten für Energie ausgebaut sind. Grundlastfähig ist derzeit die Energiegewinnung aus Biomasse und aus Wasserkraft. Bei Windkraft und Photovoltaik ist dies vor allem von Entwicklungen im Bereich Speicherkapazitäten und smart grid-Technologien abhängig. Beim derzeitigen Stand der Technik ist damit netto von einem Zubau an Kraftwerkskapazitäten auszugehen um die Grundlastfähigkeit der Energieversorgung zu erhalten (Hertwich et al. 2014). Durch Nutzung von flexiblen und reversiblen Kapazitätsmechanismen kann die Anzahl der übergangsweise notwendigen fossilen Kraftwerke allerdings auf ein Minimum reduziert werden (SRU 2013).

Nachdem im Folgenden eine allgemeine Einordnung der Auswirkungen auf Rohstoffe und Ressourcen gegeben wird, widmen sich die anschließenden Unterkapitel den unterschiedlichen erneuerbaren Energiequellen.

Auswirkungen der Instrumente auf Energieträger und ProgRess-Rohstoffe

In den gesichteten Studien werden keine Aussagen darüber getroffen, inwieweit der Neubau konventioneller Kraftwerke durch den Ausbau der erneuerbaren Energien vermindert wird und inwiefern sich die Zusammensetzung der Baumaterialien, die für konventionelle und für „erneuerbaren“ Kraftwerke verwendet werden, unterscheidet. Deshalb kann an dieser Stelle keine allgemeingültige Aussage darüber getroffen werden, inwieweit ein verminderter Materialaufwand aus dem Neubau konventioneller Kraftwerke den erhöhten Materialaufwand für den Ausbau der Erneuerbaren Energieträger aufwiegen würde und ob dieser aufgrund der möglicherweise unterschiedlichen Materialbasis überhaupt vergleichbar wäre. Die Auswirkungen eines Ausbaus der erneuerbaren Energien auf den Materialeinsatz in der Übertragungsinfrastruktur können je nach Konzept unterschiedlich ausfallen: Einerseits sind Übertragungsleitungen nötig, um Strom aus Windenergie von den Erzeugungsgebieten vor allem in Norddeutschland zu den Verbrauchern in Süddeutschland zu transportieren; gleiches gilt für den möglichen Ausbau eines europäischen Versorgungsnetzes, um temporäre regionale Nachfrage- und Erzeugungs-

schwankungen auszugleichen. Gleichzeitig bietet die Nutzung erneuerbarer Energien auch Potentiale zur Dezentralisierung der Stromversorgung, womit mittelfristig einzelne Stromtrassen überflüssig werden könnten.

Generell gilt, dass bei Erneuerbaren Energien – mit Ausnahme der Energiegewinnung aus Biomasse – der weitaus größte Teil der Materialnutzung in der Herstellungsphase der Anlagen geschieht, während konventionelle Kraftwerke auf eine kontinuierliche Versorgung mit Energierohstoffen angewiesen sind. Lebenszyklusanalysen wie die von Hertwich et al. oder Kleijn et al. kommen zu dem Ergebnis, dass Stromerzeugung aus Photovoltaik und Windenergie tendenziell einen größeren Aufwand an Eisen, Kupfer, Aluminium und Zement pro Kilowattstunde benötigt als die Nutzung fossiler Energieträger (Hertwich et al. 2014; Kleijn et al. 2011).

Ein verstärkter Einsatz von Material zu Beginn des Lebenszyklus bei den Erneuerbaren würde durch den wesentlich geringeren Verbrauch von Materialien während der Nutzungsphase überkompensiert. Berechnungen im Rahmen des MaRess-Projekts deuten darauf hin, dass der Ausbau der Erneuerbaren Energien, inklusive der dafür notwendigen Infrastruktur¹³, auch zur effizienteren Nutzung von abiotischen Materialien (inklusive fossiler Energieträger) und Wasser beiträgt. Der spezifische Ressourceneinsatz liege bei allen untersuchten Varianten „bei einem Bruchteil der Aufwendungen für Kohlekraft bzw. des Strommix 2008“ (Rohn et al. 2010). Lediglich bei Biomasse könnte die energetische Nutzung zu einem Mehrverbrauch führen. Im Folgenden wird die Energiegewinnung aus Wind-, Wasser- und Sonnenenergie sowie aus Biomasse hinsichtlich der Auswirkungen auf Rohstoffe und natürliche Ressourcen betrachtet.

Der Anteil der fossilen Energieträger am globalen Materialaufwand (TMR) von Deutschland beträgt 42 Prozent; alleine die Braunkohle ist für 31 Prozent des TMR verantwortlich. Würde beispielsweise ein Viertel der bislang durch Braunkohleverstromung in Deutschland erzeugten Elektrizität durch zusätzliche Windkraftanlagen bereitgestellt (70% onshore, 30% offshore), so würde sich nach Berechnungen des Wuppertal Instituts der TMR des gesamten deutschen Strommixes rechnerisch um etwa ein Fünftel (21%) und der TMR der gesamten Wirtschaft um 6 Prozent (=374 Mio. t) reduzieren.¹⁴ Der zu Beginn des Lebenszyklus nötige Materialaufwand von „erneuerbaren“ Kraftwerken ist vor diesem Hintergrund zu vernachlässigen (Tab.1).

Auswirkungen der Instrumente auf die Ressourcen Boden/Fläche, Atmosphäre, Wasser, Biodiversität

Inländisch gewonnene fossile Energieträger, vor allem Braunkohle, weisen einen hohen TMR auf. Die inländische nicht verwertete Entnahme (INVE) wird weitgehend durch die Extraktion von Energieträgern bestimmt. Allein der Abraum der Braunkohlegewinnung ist für ca. drei Viertel der inländischen nicht verwerteten Entnahme verantwortlich (Schütz/Bringezu 2008). Dadurch kann angenommen werden,

¹³ Untersucht wurden Windenergie (offshore & onshore), Biomasse, Photovoltaik und Solarthermie (Desertec-Konzept)

¹⁴ Basisjahr 2008, ohne Einbezug notwendiger Spitzenlastkraftwerke bzw. Speichertechnologien.

dass vor allem die Substitution von Braunkohle positive Auswirkungen auf die Ressourcen Boden/Fläche, Biodiversität sowie den lokalen Wasserhaushalt aufweist.

Der primärenergetische Einsatz von Biomasse ist hinsichtlich der Flächenerfordernisse – u.a. entstehen Flächennutzungskonkurrenzen mit der Nahrungsmittelproduktion, dem Naturschutz, sowie der Siedlung- und Verkehrsfläche – problematisch. Mit dem Anbau von Energiepflanzen gehen potentiell ein zusätzlicher Einsatz von Düngemitteln und Auswirkungen auf die Bodenqualität einher (vgl. Kap. 4.2.2).

Die Analysen von Hertwich et al. und Kleijn et al. kommen zu dem Ergebnis, dass die Nutzung Erneuerbarer Energieträger zwar zunächst zu einem Mehraufwand an Material führen kann. Die aus diesem Mehraufwand resultierenden Umwelteffekte seien aber im Vergleich mit den Auswirkungen der Herstellung und Verbrennung fossiler Energieträger als deutlich geringer einzuschätzen¹⁵ (Hertwich et al. 2014; Kleijn et al. 2011).

Ein Vergleich zwischen unterschiedlichen Energiesystemen (Tabelle 1) zeigt, dass Stromerzeugung aus Braunkohle mit Abstand den höchsten Gesamtmaterialbedarf (TMR) pro MWh aufweist, gefolgt von Biomasse-Blockheizkraftwerken und Steinkohle. Die Stromerzeugung aus Windenergie ist demgegenüber sehr viel materialeffizienter.

Tabelle 1: TMR ausgewählter Energiesysteme (netto, ab Hochspannungsnetz) sowie des deutschen Strommixes (Hochspannungsnetz) (Quelle: Wuppertal Institut)

<i>(kg/MWh_{el})</i>	<i>TMR Abiot.</i>	<i>TMR Biot.</i>	<i>TMR gesamt</i>	<i>Quelle</i>
AKW	330		330	Schmidt-Bleek 1998
Biogas-BHKW	595	2.970	3.565	Wiesen et al. 2010
Braunkohle-KW	11.200		11.200	Salzer 2008
GuD-KW	298		298	Salzer 2008
Öl-KW	469		469	Salzer 2008
Steinkohle-KW	2.150		2.150	Salzer 2008
Windpark Offshore (400 MW, HVDC)	103		103	Wiesen et al. 2012
Windpark Offshore (60 MW, 3PAC)	162		162	Wiesen et al. 2012

¹⁵ In der Untersuchung wurden die folgenden Effekte betrachtet: Treibhausgas-Emissionen, Feinstaubemissionen, Süßwasser-Ökotoxizität, Eutrophierung von Süßwasser, Nachfrage nach nicht-erneuerbarer Energie sowie die Nachfrage nach Eisen, Zement, Kupfer und Aluminium.

(kg/MWh _{el})	TMR Abiot.	TMR Biot.	TMR gesamt	Quelle
Windpark Onshore (12x5 MW)	87		87	Wiesen et al. 2010
PV (Multi-SI)	380		380	Auf Basis von Ecoinvent V.2.2 ¹⁶
Strommix Deutschland, 2008	3.150	41	3.191	Wiesen 2010

4.2.1. Energiegewinnung aus Windenergie:

Auswirkungen der Instrumente auf Energieträger und ProgRes-Rohstoffe

Grundsätzlich ist die Nutzung von Windenergie mit einem wesentlich geringeren Gesamtmaterialbedarf (TMR) pro MWh verbunden als der derzeitige deutsche Strommix (Tabelle 1).

Bei der Erzeugung von Windenergie muss zwischen Installationen an Land (onshore) und im Meer (offshore) unterschieden werden. Bei Offshore-Windanlagen sind vor allem die Netzanbindung an das Festland (Kupfer) sowie der Materialeinsatz bei der Herstellung und Verankerung der Anlagen materialintensiv. Rund 87 Prozent einer offshore-Anlage inklusive Kabel und Fundament bestehen aus Eisenmetallen, etwa 5 Prozent aus Kunststoffen. Nichteisenmetalle machen etwa ein bis drei Prozent des Gesamtgewichts aus (vgl. Wagner et al., 2010). Aufgrund ihres geringeren Gewichts und ihrer geringeren Reparaturanfälligkeit werden vor allem im Offshore-Bereich, zunehmend aber auch an Land, getriebe-lose Anlagen eingesetzt. Diese besitzen Neodym-Eisen-Bor-Magnete, die zu etwa 30 Prozent aus Seltenerdmetallen bestehen (Siemens 2013). Pro Megawatt (MW) installierter Leistung sind dies rund 200kg Neodym, bei einer 5 MW-Windkraftanlage¹⁷ entspricht dies einer Tonne Neodym.¹⁸

Das Repowering, das heißt das Ersetzen bestehender Anlagen durch Anlagen mit einem höheren Wirkungsgrad, ist gegenüber dem Neubau wesentlich ressourcenschonender, weil Fundamente und Masten weiterverwendet werden (vgl. Tabelle 1, auch: Rohn et al. 2010, 26).

Im Gegensatz zu fossilen Energieträgern, Kernbrennstoffen und der Energiegewinnung aus Biomasse benötigen Windkraftanlagen während der Nutzungsphase kein Brennmaterial. Daher liegt der gesamte Primärmaterialaufwand pro kWh deutlich unter dem des aktuellen Strommixes (vgl. Tabelle 1). Wie zu Beginn des Kapitels bereits dargestellt, ist eine vergleichende Bilanzierung der stofflichen Materialnut-

¹⁶ Unveröffentlichte Daten, interne Berechnungen des Wuppertal Instituts.

¹⁷ Dies entspricht den Turbinen, die derzeit im Alpha-Ventus Offshore-Windpark installiert sind.

¹⁸ Der Einsatz von Neodym erlaubt den Bau kompakterer Generatoren, wodurch das Gondelgewicht der Anlagen sinkt. Die daraus resultierende Materialeinsparung dürfte den Einsatz an Neodym kompensieren oder überkompensieren, der TMR der Anlagen dürfte sich also nicht signifikant unterscheiden (konkrete Berechnungen hierzu stehen aber noch aus).

zung der Windkraft ist problematisch, weil es keine Angaben über den Effekt auf den bestehenden Kraftwerkspark gibt.

Auswirkungen der Instrumente auf die Ressourcen Boden/Fläche, Atmosphäre, Wasser, Biodiversität

Die Auswirkungen von Windkraftanlagen auf die Ressourcen Boden/Fläche, Wasser, Biodiversität und Atmosphäre werden in der Literatur nicht systematisch beschrieben. Sie unterscheiden sich je nach Standort und Anlagengröße.

Eine überschlagsartige Schätzung, bei der pro Windenergieanlage für Fundament und anteilig für Erschließungswege eine bebaute Fläche von 0,4 ha angenommen wird (Zausig 2012) ergibt für den Anlagenbestand Ende 2013 einen Flächenverbrauch von rund 9.500 Hektar. Im Jahr 2013 kam es laut Deutsche WindGuard zu einem Zubau von rund 885 Anlagen (ohne Repowering) (Deutsche WindGuard, 2013), was einem zusätzlichen Flächenverbrauch von rund 350ha für Fundamente und Erschließungswege entspricht. Zum Vergleich: im Jahr 2012 wurden für Gebäude- und Freiflächen sowie Verkehrsflächen in Deutschland 18.600 ha zusätzlich genutzt.¹⁹ Sofern der Neubau von Windkraftanlagen zu einer sinkenden Nachfrage nach Energierohstoffen, vor allem nach Braunkohle, führt, kommt es zu einem verminderten Flächenverbrauch für die Rohstoffgewinnung, der dem direkten Flächenverbrauch gegenübergestellt werden muss.

Bezüglich der Auswirkungen auf Biodiversität, vor allem hinsichtlich des Artenschutzes, werden mögliche Kollisionen von Vögeln und Fledermäusen mit Windkraftanlagen thematisiert. Die konkreten Gefährdungspotentiale durch Windkraftanlagen hängen von der Standortwahl ab und können daher nicht verallgemeinert werden.

4.2.2. Energiegewinnung aus Wasserkraft

Derzeit (Stand: 2010) sind in Deutschland rund 7.400 Wasserkraftanlagen (WKA) mit einer Gesamtleistung von ca. 4,05 GW in Betrieb (Ingenieurbüro Floecksmühle et al. 2010, 7). Der Studie „Potentialermittlung für den Ausbau der Wasserkraftnutzung in Deutschland“ (Ingenieurbüro Floecksmühle et al. 2010) zufolge sei das Zubaupotential an neuen Wasserkraftanlagen begrenzt. Die meisten potentiellen Standorte für Wasserkraftwerke (>1 MW Leistung) würden heute bereits zur Energiegewinnung genutzt, beim potentiellen Zubau müssten zudem gesetzliche Vorschriften, insbesondere EG-WRRRL, FFH-RL und WHG beachtet werden. Dadurch lägen die Hauptpotentiale zur verstärkten Wasserkraftnutzung bei Verbesserungen des Wirkungsgrades bestehender Anlagen.

Auswirkungen der Instrumente auf Energieträger und ProgRess-Rohstoffe

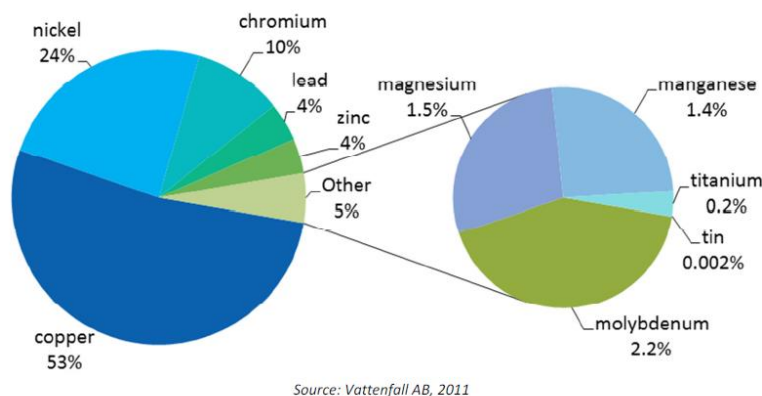
Die Verbesserung des Wirkungsgrades von Wasserkraftanlagen geschieht i.d.R. durch den Einbau von Generatoren und Turbinen mit verbesserten Wirkungsgraden. Relevante Materialien dafür sind vor al-

¹⁹ Zahlen nach: Statistisches Bundesamt, GENESIS-Datenbank: Siedlungs- und Verkehrsfläche: Ergebnis - 33111-0003.

dem Stahl und Aluminium, aber auch so genannte kritische Metalle wie Kupfer, Nickel oder Chrom (Moss et al. 2013, 21).

Abbildung 3: Metallnutzung in 14 Vattenfall-Wasserkraftwerken

Figure 2: Use of metals for 14 Vattenfall hydropower stations (excludes steel and aluminium)



Quelle: Moss et al., 2013: 21

Einer Studie von Moss et al. zufolge ist im Bereich der Wasserkraft lediglich eine „sehr geringe“ zusätzliche Nachfrage nach Metallen absehbar (Moss et al. 2013, 66). Allerdings wird auch hier die Substitution konventioneller Kraftwerke durch die verstärkte Nutzung von Wasserkraft nicht mit einberechnet.

Im Gegensatz zu fossilen Energieträgern, Kernbrennstoffen und der Energiegewinnung aus Biomasse benötigen Wasserkraftanlagen während der Nutzungsphase kein Brennmaterial. Daher liegt der gesamte Primärmaterialaufwand pro kWh deutlich unter dem des aktuellen Strommixes (vgl. Tabelle 1).

Auswirkungen der Instrumente auf die Ressourcen Boden/Fläche, Atmosphäre, Wasser, Biodiversität

Sofern keine Neubauprojekte vorgenommen werden sind keine *direkten* Effekte auf die Nutzung von Boden/Fläche, Wasser und Biodiversität anzunehmen. Die Durchflussmenge wird bei Stauanlagen lediglich während des Auffüllens des Staubeckens verringert, danach entspricht die abgegebene Menge dem Zulauf, so dass die ursprüngliche Wassermenge auch im Unterlauf wieder zur Verfügung steht. Allerdings stellen Stauanlagen, Wehre etc. Barrieren für Fische dar und können so negative Folgewirkungen auf die Biodiversität haben. Sofern ein Ausbau der Wasserkraft zu einer Substitution von fossilen Energieträgern führt, sind positive Wirkungen auf die Nutzung der Atmosphäre zu erwarten.

4.2.3. Energiegewinnung aus Biomasse

Biomasse wird vorwiegend in Form von biogenen festen Brennstoffen (v.a. Holz) zur Wärme- und Stromgewinnung genutzt. Daneben kann Biomasse in Biogasanlagen zur Stromerzeugung oder im Verkehrsbereich in Form von Biokraftstoffen genutzt werden. Im 2012 machte die Stromerzeugung aus Biogas mit rund 24,8 Millionen Kilowattstunden rund 4,1 Prozent am gesamten Bruttostromverbrauch aus. Im gleichen Zeitraum wurden in Deutschland ca. 3,8 Millionen Tonnen Biokraftstoffe in reiner Form oder beigemischt verkauft (BMU 2013, 16).

Auswirkungen der Instrumente auf Energieträger und ProgRess-Rohstoffe

Bei der energetischen Nutzung von Biomasse in Biogasanlagen hängt – laut den Ergebnissen des Ma-Ress-Forschungsprojekts – der Ressourcenverbrauch pro Kilowattstunde „von der Art der verwendeten Substrate, dem Düngerverbrauch und dem damit zusammenhängenden Anbauverfahren, der Transportdistanz und der Art und Größe der Anlage“ (Rohn et al. 2010, 26) ab und müsse anlagenspezifisch bewertet werden. Für die Anlage sei vor allem die Nutzung von Beton und Stahl für die Gärbehälter bedeutsam (Rohn et al. 2010, 28).

Seit 2010 übersteigt die energetische Nutzung von Holz (sowohl Waldholz als auch Rest- und Recyclingstoffe) erstmalig die stoffliche Nutzung (vgl. auch Abbildung 4 in Kapitel 5.1.2). Diese Entwicklung ist allerdings nicht alleine auf die verstärkte energetische Nutzung, sondern auch auf einen Rückgang der stofflichen Nutzung im Rahmen des Konjunktureenbruchs in 2009 zurückzuführen (Mantau 2012, 7). Weil die Potentiale im Bereich Restholz- und Kaskadennutzung für die energetische Nutzung von Holz gering seien, sind laut der Holzrohstoffbilanz Deutschland „nennenswerte Potentiale [...] nur im Waldholz verfügbar und dies auch nur, wenn die gesellschaftliche Akzeptanz für eine intensivere Holznutzung steigt“ (Mantau 2012, 22).

Auswirkungen der Instrumente auf die Ressourcen Boden/Fläche, Atmosphäre, Wasser, Biodiversität

Die Verfügbarkeit von Anbaufläche setzt der Nutzung von Biomasse Grenzen (Faulstich et al. 2012). Im Erntejahr 2011 wurden auf rund einem Fünftel²⁰ der Ackerfläche in Deutschland nachwachsende Rohstoffe angebaut. Davon wurden rund 86 Prozent energetisch und 14 Prozent stofflich genutzt (Faulstich et al. 2012). Grundsätzlich kommt es durch die energetische Nutzung von Biomasse zu Verlagerungstendenzen von fossilen Energieträgern zu den Ressourcen Fläche, Boden und je nach Anbaumethode auch Wasser. Studien deuten darauf hin, dass die verstärkte Nachfrage nach biotischen Ressourcen zu einer Ausdehnung der Landnutzung in andere Länder führt. Die globale Landnutzung pro Kopf in der EU habe bereits im Jahr 2007 – vor dem starken Anstieg der energetischen Biomassenutzung in Deutschland – ein „gerechtes“ Niveau überschritten (Bringezu et al. 2012). Den Berechnungen von Bringezu et al. zufolge habe jeder EU-Bürger 0,45 ha der globalen Anbaufläche in Anspruch genommen, was im Resultat die europäische Anbaufläche um ein Fünftel übersteige (UNEP 2014, 70 ; Bringezu et al. 2012, 227). Durch die zu erwartende Bevölkerungsentwicklung verringere sich jedoch der „gerechte“ Anteil an landwirtschaftlicher Nutzfläche über die Zeit weiter (Bringezu et al. 2012, 227).

Die resultierenden direkten und indirekten Landnutzungsänderungen führten zudem häufig zur Emission weiterer Treibhausgase (Dehoust et al. 2014; Bringezu et al. 2012). Entsprechend werden Minderungspotentiale für Treibhausgas-Emissionen aus der Nutzung von Biokraftstoffen in einschlägigen Studien skeptisch beurteilt. Für Biodiesel und Bioethanol wird zwar ein Emissionsminderungspotential gegenüber der Nutzung fossiler Energieträger vermutet; werden jedoch Landnutzungsänderungen mit in die Kalkulation einbezogen, wird die Treibhausgasbilanz weitaus weniger günstig. Für diesen Fall wird in

²⁰ Ca. 2,3 Mio. ha von insgesamt 12 Mio. ha (Faulstich et al. 2012)

einigen Studien sogar eine Zunahme der Emissionen ausgewiesen (Hermeling/Wölfling 2011, 43; Dehoust et al. 2014, 13; BMU 2013, 26). Ein Report der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO) verweist auf eine verstärkte Integration des landwirtschaftlichen Marktes mit dem Energiemarkt. Ein Großteil der Produktion von Biotreibstoffen würde durch Substitutionen und Politikinstrumente wie Beimischungsquoten gefördert. Der resultierende verstärkte Anbau von Energiepflanzen führe zu Flächennutzungskonkurrenzen mit dem Anbau von Nahrungsmitteln (Alexandratos/Bruinsma 2012, 18; UNEP 2014).

Mit dem Anbau von Biomasse können zudem negative Auswirkungen auf die Qualität und Verfügbarkeit von Wasser und auf die Biodiversität einhergehen, zum Beispiel durch die Umwandlung von Grünland in intensiv bewirtschaftete landwirtschaftliche Nutzfläche, den Einsatz von Düngemitteln oder von Pflanzenschutzmitteln.

Eine Option um die Nachfrage nach Biomasse für die stoffliche und energetische Nutzung zu verringern ist die Kaskadennutzung von biotischen Rohstoffen, bei der die energetische Verwertung die letzte Nutzungsstufe darstellt. Weil mit der Nutzung von Abfall-Biomasse keine Landnutzungsänderungen verbunden sind, die möglicherweise zu einer erhöhten Freisetzung des im Boden gebundenen CO₂ führen könnte, wird dieser Option ein hohes Potential zur Emissionsminderung beigemessen (Hermeling/Wölfling 2011; Carus et al. 2014; Bringezu et al. 2012). Laut Koalitionsvertrag zwischen CDU/CSU und SPD soll die EEG-Förderung beim Zubau von Biomassekraftwerken „überwiegend auf Abfall- und Reststoffe begrenzt“ werden (CDU/CSU/SPD 2013, 39).

4.2.4. **Energiegewinnung aus Photovoltaik:**

Photovoltaik besaß im Jahr 2013 einen Anteil von rund 4,5 Prozent an der Bruttostromgewinnung (AG Energiebilanzen 2013). Bei der Stromerzeugung durch Photovoltaik gibt es unterschiedliche Technologien, die sich hinsichtlich des Materialaufwands stark unterscheiden.

Auswirkungen der Instrumente auf Energieträger und ProgRes-Rohstoffe

Derzeit am weitesten verbreitet sind waferbasierte oder kristalline Solarzellen (Solarzellen der ersten Generation), die auf mono- oder multikristallinem Silizium²¹ basieren. Ihr Marktanteil betrug in 2013 rund 90 Prozent (Wirth 2014). Daneben enthalten kristalline Solarzellen Silber, das in Zukunft durch Kupfer substituiert werden soll. Der jährliche Silberverbrauch der Photovoltaik-Industrie wird mit derzeit ca. 1500 t Silber angegeben, was knapp 7% der gesamten Fördermenge in 2010 entspricht (Wirth 2014).

Sogenannte Solarzellen der zweiten Generation nutzen die Dünnschichttechnologie. Ihre Entwicklung war nicht zuletzt eine Reaktion auf rasant steigende Siliziumpreise; durch den Preisverfall in den letzten Jahren konnten sie sich jedoch nicht gegen waferbasierte Solarzellen durchsetzen. In Dünnschichtmodulen werden als Halbleitermaterialien je nach Technologie Indium, Selen, Gallium, Tellur oder Cadmium

²¹ sogenanntes Solargrade-Silizium (SoG-Si).

eingesetzt, die auf Glas oder Metalle als Trägermaterialien aufgetragen werden (Behrendt et al. 2010; Wirth 2014). Die Verwendung von Cadmium ist auch hinsichtlich der Gefahrenpotentiale problematisch. Insgesamt dominieren nach Gewicht Glas und Rahmenmaterial, i.d.R. Aluminium (Behrendt et al. 2010).

Wie bereits dargestellt benötigen Photovoltaikanlagen während der Nutzungsphase kein Brennmaterial. Daher liegt der gesamte Primärmaterialaufwand pro kWh deutlich unter dem des aktuellen Strommixes (vgl. Tabelle 1).

Auswirkungen der Instrumente auf die Ressourcen Boden/Fläche, Atmosphäre, Wasser, Biodiversität

Die direkten Auswirkungen der Energiegewinnung aus Photovoltaik auf die Ressourcen Boden/Fläche, Atmosphäre, Wasser und Biodiversität sind unklar und unterscheiden sich je nach Anlagentyp und Standort (Freifläche, Dach, etc.). Sofern fossile Energieträger durch Photovoltaik ersetzt werden kommt es zu einer Verminderung von CO₂-Emissionen der Energieerzeugung in die Atmosphäre.

Direkte Auswirkungen des Ausbaus der Erneuerbare Energien auf die Ressourcentypen*)											
Wirkung auf die Nutzung von:	Massenmetalle	„kritische“ Rohstoffe	Baumineralien	Industriemineralien	Energieträger (fossile und Kernbrennst.)	Biomasse		Wasser	Fläche Boden	Biodiv	Atmosphäre
	Maßnahme					Stoffl.	Energ.				
Windenergie	↑	↑			↓						↓
Wasserkraft		↑			↓						↓
Biomasse	↑		↑	↑	↓		↑	↑	↑	↑	↑↓
Photovoltaik		↑			↓						↓

*) Auswirkungen auf den Bestand und den Neubau konventioneller Kraftwerke sind hier nicht berücksichtigt.

4.3. Ziel: Ausbau der Elektromobilität

Die Bundesregierung verfolgt das Ziel, Leitmarkt und Leitanbieter für Elektromobilität zu werden und möchte bis zum Jahr 2020 eine Million elektrisch betriebener Fahrzeuge auf den Markt bringen. Dazu werden PKW mit Elektroantrieb mit Steuervergünstigungen und Finanzhilfen gefördert.

Auswirkungen der Instrumente auf Energierohstoffe und ProgRess-Rohstoffe

Sofern durch die Förderprogramme keine Anreize gesetzt werden, zusätzliche Fahrzeuge neu zuzulassen, sondern Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor durch Elektromobile ersetzt werden, ist keine Auswir-

kung auf den Fahrzeugbestand abzusehen. Dagegen kann sich die Rohstoffbasis der Fahrzeuge verschieben.

Bei einer verstärkten Nutzung von Elektrofahrzeugen wird die Nachfrage nach „kritischen Rohstoffen“ absehbar ansteigen. Beispielsweise seien derzeit für die Batterie eines Hybrid-Fahrzeugs rund 20 Kilogramm seltene Erden nötig (Cleanenergy Project 2013), für die Motoren würden Neodym-Eisen-Bor-Magnete gebraucht, die zu rund einem Drittel aus Neodym und anderen Seltenerdmetallen bestehen (Siemens 2013). Insgesamt wird eine verstärkte Nachfrage nach Kupfer, Neodym, Nickel, Lithium, Kobalt, Dysprosium, Titan, Magnesium, Aluminium, Scandium und Indium prognostiziert (Angerer/Erdmann/et al. 2009; Schrode et al. 2010; Exner et al. 2013; Buchert 2011; Fraunhofer ISI 2012). Vor allem beim Recycling von Lithium sind einer Studie von Fraunhofer ISI zufolge Fortschritte nötig um eine sichere Rohstoffbasis zu gewährleisten (Schroeder 2013). Dies gilt weitgehend auch für das Recycling von Seltenen Erden Metallen. Beispielsweise findet bis heute weltweit kein Recycling von Dysprosium statt (Buchert et al., 2011).

Die Erhöhung der Reichweite von Elektromobilen ist ein wesentlicher Aspekt der derzeitigen Entwicklung. Daher werden Bemühungen um eine Gewichtsreduzierung der Fahrzeuge forciert. Dabei spielen neue Werkstoffe eine wichtige Rolle. Beispielsweise besitzt der BMW i3 eine Fahrgastzelle aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK).

In wieweit Elektroautos einen höheren Wirkungsgrad als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren aufweisen ist umstritten und hängt im Wesentlichen von den Systemgrenzen der Untersuchung ab. Betrachtet man das Verhältnis von Ladeenergie und Antriebsenergie ("tank-to-wheel") weisen Elektromotoren einen wesentlich höheren Wirkungsgrad auf als benzin- oder dieselgetriebene Motoren (DEKRA 2011).²² Entscheidender ist aber das Verhältnis von Primärenergie zur Antriebsenergie („well-to-wheel“). Hier ist die Effizienz der Stromerzeugung (Umwandlung von Primärenergie in Elektrizität) und des -transports entscheidend. Je nachdem wie die Elektrizität gewonnen wurde kann der höhere Wirkungsgrad des Elektromotors gegenüber Benzin- und Dieselmotoren sogar kompensiert werden. Nach Angaben der AG Energiebilanzen lag der durchschnittliche Wirkungsgrad der Stromerzeugungsanlagen in Deutschland im Jahr 2013 bei knapp 45 Prozent (AG Energiebilanzen 2014). Insofern kann auch ein Elektromotor mit einem Wirkungsgrad von 90 Prozent eine höhere Nachfrage nach Energierohstoffen induzieren als ein sparsamer Verbrennungsmotor. Inwiefern die Förderung der Elektromobilität auch einen Einfluss auf die Nachfrage nach Energierohstoffen hat, wird maßgeblich durch den genutzten Strommix determiniert.

Auswirkungen der Instrumente auf die Ressourcen Boden/Fläche, Wasser, Atmosphäre Biodiversität

Die Auswirkungen auf die Ressourcen Boden/Fläche, Wasser, Atmosphäre und Biodiversität unterscheiden sich vor allem je nach Strommix, der zur Energiebereitstellung genutzt wird und dem Wirkungsgrad der Stromerzeugungsanlagen bei der Verwandlung von Primärenergie in Elektrizität.

²² Bei kalten Temperaturen geht allerdings fast die Hälfte der Ladeenergie durch Verluste an der Hochvoltbatterie verloren (DEKRA 2011).

Direkte Auswirkungen des Ausbaus der Elektromobilität auf die Ressourcentypen*)

Anmerkung: die Tabelle dient dem Überblick – die darin enthaltenen Pfeile stellen Tendenzen dar; tatsächlich sind die Wirkungen in hohem Maße von Bedingungen abhängig und die Pfeile für Einzelfälle daher zu hinterfragen.

Wirkung auf die Nutzung von:	Massenmetalle	„kritische“ Rohstoffe	Baumineralien	Industriemineralien	Energirohstoffe	Biomasse		Wasser	Fläche Boden	Biodiv	Atmosphäre
Maßnahme						Stoffl.	Energ.				
Elektromobilität		↑			**)						

*) Auswirkungen auf den Bestand und den Neubau konventioneller Kraftwerke sind hier nicht berücksichtigt.

**) Bei den Energierohstoffen ist eine Verschiebung weg von Erdöl und hin zu anderen Energieträgern abzusehen.

4.4. Zwischenfazit zu Kapitel 4:

Im vorangegangenen Kapitel wurden die Auswirkungen der Politik der Energiewende auf die verschiedenen Ressourcenkategorien analysiert, um Synergien und Konflikte zur Ressourceneffizienzpolitik zu identifizieren. Die untersuchten Beispiele deuten darauf hin, dass die Ziele der Energiewende absehbar zu einer Verschiebung der Ressourcenbasis führen. Bei den Energierohstoffen werden demnach weniger fossile Energieträger und Uran und mehr erneuerbare Energieträger – Wasserkraft, Wind- und Solarenergie sowie Biomasse – genutzt. Bei den stofflich genutzten Rohstoffen kann es, wie beispielsweise beim Leichtbau als Maßnahme zur Verringerung des Energieverbrauchs von Kraftfahrzeugen, zu Verschiebungen bei der Materialauswahl kommen. Zudem wird Material für die Gebäudeisolierung sowie für den Umbau der Energieinfrastruktur aufgewendet. Bei letzterem spielen die so genannten kritischen Rohstoffe eine wichtige Rolle. Ein methodisches Problem bei der Bewertung sind fehlende Informationen über die Auswirkungen des Ausbaus der erneuerbaren Energien auf den bestehenden Kraftwerkspark und die Versorgungsinfrastruktur.

So kann zwar durch einzelne Maßnahmen zunächst ein zusätzlicher Materialaufwand entstehen, wenn die Verbesserung der Energieeffizienz durch einen erhöhten Einsatz von Material oder die Nutzung ressourcenintensiver Materialien – bspw. Primär- anstelle von Sekundärrohstoffen oder schwer zu recycelnde Werkstoffe – erkaufte wird. Die Befunde der untersuchten Studien deuten jedoch darauf hin, dass diese trade-offs im Laufe der Nutzungsphase durch den geringeren Input an Energieträgern überkompensiert werden. Gleichwohl bestehen auch bei den Materialaufwendungen, die mit der Umsetzung der energiepolitischen Zielsetzungen verbunden sind, weitere Effizienzpotentiale. Um die Effekte der energiepolitischen Maßnahmen auf die Ressourcennutzung bilanzieren und Problemverlagerungen erfassen zu können, ist es wichtig, über beide Politikfelder konsistente Indikatoren zu entwickeln und zu nutzen.

Die Nutzung von Biomasse hat sich in der Analyse als ein zentrales Problemfeld mit vielfältigen Beziehungen zu den anderen Ressourcen, v.a. Fläche, Boden, Wasser und Atmosphäre, herausgestellt. Neben globalen Problemverlagerungen kann die energetische Nutzung von Biomasse auch zu trade-offs mit den Zielen der Ressourceneffizienz (Substitutionspotentiale) führen. Diese sollten verstärkte Aufmerksamkeit erfahren um die Kohärenz energiepolitischer Ziele mit den Zielen der Ressourceneffizienzpolitik zu gewährleisten.

5. Auswirkungen der Ressourceneffizienz auf die Energiewende

Ein Ziel des deutschen Ressourceneffizienzprogramms ist es, die Entnahme und Nutzung natürlicher Ressourcen nachhaltiger zu gestalten sowie die damit verbundenen Umweltbelastungen so weit wie möglich zu reduzieren (Deutsche Bundesregierung, 2012: 24). In der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie wird eine Verdoppelung der Rohstoffproduktivität bis 2020 gegenüber dem Jahr 1994 als Ziel formuliert (Deutsche Bundesregierung, 2012b: 93).

Im nachfolgenden Kapitel wird nach den Schnittstellen zwischen Ressourceneffizienz und Energiewende gefragt, wobei die Wirkrichtung – anders als im vorangegangenen Kapitel – nun von den Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz ausgeht. Die Frage lautet entsprechend: wie wirken sich die Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz und die daraus resultierenden Aktivitäten auf die Nutzung der verschiedenen Ressourcentypen aus? Der Fokus liegt hier auf den Auswirkungen auf die Energieträger und damit letztlich auf die Emissionen von Treibhausgasen. Auch hier werden die indirekten Effekte, die durch die Ressourcennutzung entstehen auf Basis der Analyse der Literatur identifiziert. Es ist ebenfalls darauf hinzuweisen, dass weitere indirekte Effekte möglich sind, die bisher noch nicht als relevant thematisiert worden sind oder die erst dann auftreten, wenn Skaleneffekte eintreten.

Unter Ressourceneffizienz wird das Verhältnis eines bestimmten Nutzens zu dem dafür erforderlichen Ressourceneinsatz verstanden. Je geringer der für einen bestimmten Nutzen nötige Input an natürlichen Ressourcen oder je höher der Nutzen des Produktes bzw. der Dienstleistung bei gleichbleibendem Ressourcenaufwand, desto höher ist die Ressourceneffizienz. Dabei ist es wichtig, nicht nur die Effizienz einzelner Prozesse, sondern die ganzer Prozessketten lebenszyklusweit zu betrachten, um letztlich die Ressourcenproduktivität der Wirtschaft als Ganzes zu steigern. Ressourceneffizienz wird vom VDI ZRE als nachhaltiger und verantwortungsvoller Umgang mit den natürlichen Ressourcen definiert - wobei durch innovative Produkte und Verfahren das gleiche Ergebnis mit weniger Mitteln erzielt werden kann (VDI ZRE Website). Mit diesem Verständnis von Ressourceneffizienz können drei zentrale Ansätze einer Ressourceneffizienzpolitik ausgemacht werden: Ressourceneffizienzsteigerung in der Produktion (inklusive ressourceneffizienter Produkte), Förderung eines ressourcenleichten Konsum sowie Ausbau der Abfall- und Kreislaufwirtschaft.

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass die verminderte Nutzung von Rohstoffen allgemein zur Senkung des Energieeinsatzes bei der Rohstoffgewinnung, -aufbereitung und Transport (UNEP 2013b) und damit auch zur Senkung der Treibhausgas-Emissionen beiträgt (International Energy Agency, 2012: II.75). Der Rohstoffsektor ist einer der größten industriellen Energieverbraucher im In- und Ausland und rohstoffintensive Sektoren sind häufig auch die energieintensivsten Industriebranchen (International Energy Agency, 2012: II.75). Entsprechend führt eine Reduktion des Rohstoffeinsatzes auch zu geringerem Energieverbrauch. Auch die Herstellung von Grundwerkstoffen ist energieintensiv und teilweise müssen fossile Energieträger zwingend eingesetzt werden um den darin enthaltenen Kohlenstoff zu nutzen (z.B. Stahl, Zement, verschiedene chemische Grundstoffe). So muss bei der Herstellung von Primärstahl Steinkohle (Koks als Reduktionsmittel) eingesetzt werden, in Recyclingverfahren wird dagegen elektrischer Strom genutzt. Dadurch ist letzteres besser kompatibel mit den Zielen der Energiewende. Weiterhin ist Recyclingstahl im Vergleich zum erzbasierten Stahl mit einem geringeren Primärmate-

rialaufwand verbunden: 8,1 t/t TMR für 100% Hochofenstahl aus Erz gegenüber nur 1,5 t/t TMR für 100% Recyclingstahl (Wuppertal Institut für Klima Umwelt Energie 2014).

Laut dem Bericht der Projektgruppe 3 der Bundestags-Enquete-Kommission ‚Wachstum, Wohlstand Lebensqualität‘ gehen circa 50 Prozent der industriellen CO₂-Emissionen in Deutschland auf die Produktion und Verarbeitung der Grundstoffe Stahl, Zement, Papier, Plastik und Aluminium zurück (Deutscher Bundestag, 2013, Teil D: Projektgruppe 3, FN 917).

Im Folgenden werden die drei ressourcenpolitischen Handlungsansätze hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die unterschiedlichen Ressourcengruppen untersucht.

5.1. Ziel: Ressourceneffizienz in der Produktion steigern (inkl. ressourceneffiziente Produkte)

Ein Ziel der Ressourceneffizienzpolitik ist es, Produktionsprozesse so zu gestalten, dass der Materialeinsatz pro Produkteinheit verringert wird. Die nachfolgende Tabelle verdeutlicht die Material- und Kostenreduktionspotenziale durch ressourceneffiziente Produktion in verschiedenen Branchen.

Tabelle 2: Materialeinsparpotential und Kosteneinsparung nach Branchen.

Branchen	Umsatz (in Tsd. Euro, 2008) ^(a)	Material- kostenanteil (in Prozent) ^(a)	Durchschnittliches Einsparpotenzial (in Prozent) ^(b)	Kosteneinsparung bei x-Prozent Materialeinsparung (in Tsd. Euro, 2008) ⁽¹⁾
Fahrzeugbau	372.192.394	54,3%	7,7%	15.697.557
Maschinenbau	232.016.419	43,2%	7,0%	7.188.325
Elektroindustrie, incl. MMSRO ⁽²⁾	199.657.870	38,1%	7,1%	5.480.698
Ernährungsgewerbe	161.228.728	54,7%	5,2%	4.600.890
Chemische Industrie	179.524.810	35,4%	6,3%	4.030.207
Metallerzeugung und -bearbeitung	116.293.992	55,5%	5,9%	3.808.173
H.v. Metallerzeugnissen	104.248.653	41,0%	6,1%	2.645.873
H.v. Gummi- und Kunststoffwaren	69.599.064	41,5%	8,2%	2.376.718
Papiergewerbe	38.581.335	45,7%	4,3%	758.928
Glasgewerbe, Keramik	39.083.179	32,0%	5,5%	689.942
Textil-, Bekleidungs- und Ledergerwerb	22.581.232	41,6%	6,5%	613.259
Holzgewerbe	18.217.587	51,2%	5,0%	468.882
Verlag- und Druckgewerbe	17.951.767	36,7%	7,0%	461.521

Quellen: (a) Statistisches Bundesamt 2010a; (b) Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2009, Fraunhofer ISI, eigene Berechnungen.

Anmerkungen: (1) Die Berechnungen basieren auf den Angaben zu Umsatz und Materialkostenanteil (Spalte 1 und 2, Statistisches Bundesamt 2010a) sowie den Daten zum Einsparpotenzial (Spalte 3, Fraunhofer ISI 2009); (2) MMSRO: Medizin-, Mess-, Steuer- und Regelungstechnik, Optik

Quelle: Schröter et al., 2011, p. 10

*Anmerkung zu Spalte 5: die x-Prozent beziehen sich auf die Einsparpotenziale in den verschiedenen Branchen, aus der Erhebung *Modernisierung und Produktion* 2009 (Schröter et al. 2011: 8).

Es wird deutlich, dass – vorausgesetzt der Einsatz an Technologien bleibt unverändert – mit der Verminderung des Materialeinsatzes eine Verminderung des Energieeinsatzes einher geht. Unter den ProgRess-

Handlungsansätze zur Steigerung der Ressourceneffizienz in der Produktion finden sich beispielsweise die Förderung der Einführung umfassender Umweltmanagementsysteme, betriebliche Effizienzberatung sowie die Förderung von ressourcen- und energieeffizienten Produktions- und Verarbeitungsprozessen (Deutsche Bundesregierung 2012a)²³. Zur ressourceneffizienten Produktion können ebenfalls Ansätze gezählt werden, die auf die Herstellung ressourceneffizienter Produkte abzielen. In ProgRes wird u.a. in Handlungsansatz 1, 6 und 17 auf die Bedeutung der Substitution von kritischen und umweltrelevanten Rohstoffen durch andere Rohstoffe für die Ressourceneffizienz eingegangen (Deutsche Bundesregierung 2012a).

5.1.1. Effizienzsteigerung in der Produktion

Auswirkungen der Instrumente auf ProgRes-Rohstoffe und Energieträger

Möglichkeiten zur Verbesserung der Materialeffizienz in der Produktion umfassen Verbesserungen bei Produkten und bei Fertigungsprozessen wie beispielsweise die Vermeidung von Verschnitt (d.h. die optimale Ausnutzung eines flächigen Ausgangsmaterials beim Zuschnitt oder beim Stanzen), die Optimierung von Materialdicken oder die Nutzung von standardisierten Komponenten und Baukastensystemen.

Stanzabfälle können je nach Bauteilform und verfügbaren Halbzeugabmessungen bis zu 80 Prozent des Materialeinsatzes ausmachen (Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg 2010: 63). In der Automobilproduktion werden in der Metallverarbeitung bis zu 60 Prozent der eingesetzten Bleche zu Produktionsabfällen (FhG, n.d.: 12).

Ein optimierter Zuschnitt von Metallwerkstoffen (auch von biobasierten Werkstoffen) führt zu einer Reduktion des Einsatzes energetischer Ressourcen, die sonst für die Herstellung des überschüssigen Materials nötig gewesen wären. In Kapitel 4.1.3 wurde bereits die Nutzung spezieller Fertigungsverfahren im Leichtbau diskutiert. Dadurch soll der Materialeinsatz verringert und somit der Kraftstoffverbrauch in der Nutzungsphase gesenkt werden. Allerdings ist der Einsatz von Recyclingmaterialien aufgrund der Qualitätsanforderungen an die Werkstoffe häufig nicht möglich. Sofern vermehrt Eisenerze anstelle von Sekundärmaterial genutzt werden, würde dies zunächst eine verstärkte Inanspruchnahme von Energieträgern für die Extraktion und Aufbereitung von Primärmaterial bedeuten. Demgegenüber argumentieren Ellenrieder et al., dass durch den reduzierten Bedarf an Stahl sowie die Verwertung der Verschnitte in der Elektrostahl-Route die Treibhausgas-Emissionen bereits in der Fertigung niedriger ausfallen könnten als die konventionell tiefgezogener Bleche (Ellenrieder et al. 2013, 58).

Auswirkungen der Instrumente auf die Ressourcen Boden/Fläche, Wasser, Atmosphäre, Biodiversität

Durch die oben genannten Maßnahmen zur Verbesserung der Materialeffizienz werden auch die Ressourcen Fläche, Wasser, Atmosphäre und Biodiversität geschont, da weniger Rohstoffe und weniger

²³ In ProgRes wird auch Substitution sowie die Einbeziehung von Ressourceneffizienz in Produktgestaltung und Normung unter „Ressourceneffizienz in der Produktion“ gelistet – dies wird hier weiter unten als gesonderter Ansatz besprochen.

Energie (und damit Emissionen) zur Herstellung und Nutzung der Materialien benötigt werden. Auch bei biobasierten neuen Werkstoffen führt eine optimierte Nutzung des Materials und die damit einhergehende geringere Nutzung von Biomasse zu einer Schonung der Ressourcen Fläche, Wasser, Böden und Biodiversität.

5.1.2. Substitution bzw. der Einsatz neuer Werkstoffe zur Verbesserung der Ressourceneffizienz von Produkten

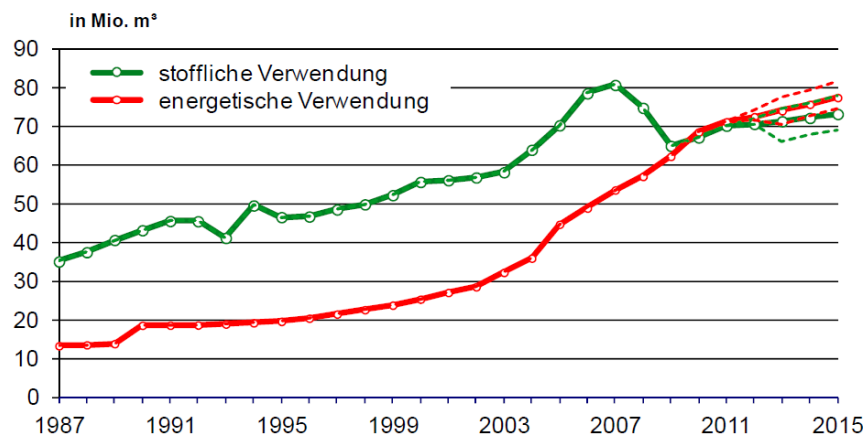
Auswirkungen der Instrumente auf ProgRess-Rohstoffe und Energieträger

Bei der Substitution bzw. dem Einsatz neuer Werkstoffe sollen kritische bzw. besonders umweltrelevante Rohstoffe (z.B. energieintensive) durch weniger kritische und/oder weniger umweltschädliche Rohstoffe ersetzt werden – wobei die Funktionalität der Bauteile oder Endprodukte bei der Materialsubstitution erhalten werden soll. In vielen Bereichen wird stofflich genutzte Biomasse als Substitut für abiotische Rohstoffe eingesetzt. Beispiele sind die Substitution von Baumineralien (und Zement) sowie Stahl durch Holz, die Substitution von erdölbasierten Dämmstoffen durch Pflanzenfasern bei der Gebäudeisolierung oder die Nutzung neuer, biobasierter Werkstoffe zur Substitution von Metallen und Kunststoffen. Während in der Regel mit einem verminderten Einsatz von Energieträgern gerechnet werden kann, hängt die tatsächliche Umweltbilanz bei der Substitution von abiotischen durch biotische Rohstoffe unter anderem von Anbaumethoden (z.B. Dias & Arroja, 2012; Rettenmaier et al., 2014: 56) und Transportwegen (vgl. Forum Nachhaltiges Bauen, n.d.) des biotischen Materials ab. Im Zusammenhang der Energiewende können außerdem Nutzungskonkurrenzen zwischen der stofflichen und der energetischen Nutzung von Biomasse entstehen (Bringezu et al. 2008). Ein Lösungsansatz hierfür ist die Kaskadennutzung von biotischen Rohstoffen (Carus et al. 2014: 22f).

Im Baubereich können vor allem Beton, Stein und Stahl durch biotische Rohstoffe ersetzt werden (Carus et al. 2014: 54). Werden Baumineralien oder Stahl beispielsweise durch Holz substituiert, hat dies eine senkende Wirkung auf den Energiebedarf, da die Zement- und Stahlproduktion im Vergleich zu Holz sehr energieintensiv ist (Bribián, Capilla, & Usón, 2011; Buchanana & Levine, 1999; Goverse, Hekkert, Groenewegen, Worrell, & Smits, 2001; Sathre/Gustavsson 2009).

Holz hat als konstruktiver Baustoff 2010 einen Anteil von 12 Prozent am Wert der fertiggestellten Wohnungen ausgemacht, mit steigender Tendenz (Schwarzopp, Drescher, Gornig, & Blazejczak, 2013: 51). Durch verbesserte statische Eigenschaften von Holzbinderkonstruktionen werden zunehmend auch mehrgeschossige Bauten als überwiegende Holzkonstruktionen möglich (Holzbau-Magazin 2012; zitiert nach Schwarzopp et al. 2013). Insgesamt wird mit steigenden Holzanteilen bei den Neubauplanungen gerechnet (Bau Info Consult 2011).

Abbildung 4: Entwicklung der stofflichen und energetischen Holzverwendung in Mio. m³ 1987 bis 2015



Quelle: Mantau 2012: 8

Die stoffliche Nutzung von Holz hat im Vergleich zu anderen Bau- und Werkstoffen einen geringeren Energiebedarf (Bribián, Capilla, & Usón, 2011; Buchanan & Levine, 1999; Goverse, Hekkert, Groenewegen, Worrell, & Smits, 2001)(Sathre/Gustavsson 2009). Lange Transportdistanzen können die positive Bilanz jedoch schmälern, weshalb die Verwendung lokaler Holzressourcen empfohlen wird (Forum Nachhaltiges Bauen n.d.). Jedoch ist u.a. laut dem Deutschen BiomasseForschungsZentrums (DBFZ) sowohl global als auch für Deutschland mit einer Versorgungslücke bei Holz zu rechnen (Ponitka et al. 2011). In Deutschland liege die zu erwartende jährliche Versorgungslücke in einer Größenordnung von etwa 30 Mio. m³ Holz (ebd.).

Auch bei stofflich genutztem Erdöl ergeben sich Substitutionsmöglichkeiten durch biogene Materialien. In Deutschland werden laut einer UBA-Studie knapp 4 % der genutzten fossilen Rohstoffe stofflich genutzt, wobei Erdöl dabei die Basis bildet (Carus et al. 2014: 54). Dämmmaterialien aus nachwachsenden Rohstoffen (Weichfaserplatten, Zellulosefasern) weisen im Vergleich zu Kunststoffschäumen, die aus Rohöl hergestellt werden, oder mineralische Dämmprodukte (Stein- und Glaswolle), die niedrigste Graue Energiebilanz auf. Unter Grauer Energie wird die Energiemenge bezeichnet, die für Herstellung, Transport, Lagerung, Verkauf und Entsorgung eines Produktes benötigt wird. Auch hier gilt entsprechend, dass die Umweltbilanz der biotischen Rohstoffe von Anbaupraktiken und Transportwegen abhängt.

Potenziell lassen sich weiterhin Industriemineralien, die in mineralischen Düngemitteln genutzt werden, durch Wirtschaftsdünger (Gülle, etc.) ersetzen. Durch das regional konzentrierte Aufkommen an Wirtschaftsdüngern wären bei einer überregionalen Nutzung jedoch zusätzliche Transportwege nötig, die zu einem zusätzlichen Energieaufwand führen würden (Bund-Länder-Arbeitsgruppe zur Evaluierung der Düngeverordnung 2012: 174). Da Wirtschaftsdünger zudem transportsensitiv sind (d.h. dass sich die Transportkosten aufgrund des niedrigen Preises bei hohem Gewicht/Volumen stark auf die Preise auswirken), sind die Substitutionspotentiale als gering einzuschätzen.

Stahl kann zum Beispiel durch Leichtmetalle oder Faserverbundwerkstoffe (Carbon, Glasfasern, Naturfasern etc.) ersetzt werden. Diese Leichtbau-Produkte sind in der Regel energieeffizienter als herkömmli-

che Produkte. Allerdings stehen dem derzeit noch große Aufwendungen bei der Gewinnung und Herstellung der Substitute gegenüber (siehe Kapitel 4.1.3).

Abgesehen vom Baubereich bzw. der Nutzung im Leichtbau können Erze und Metalle (relevant vor allem Eisen/Stahl, Aluminium und Kupfer; Carus et al. 2014: 56) nur im geringen Maße durch biotische Rohstoffe substituiert werden, da sich dieses meist schwierig gestaltet (Graede et al. 2013). Bei Seltenen Erden sind die Substitutionsmöglichkeiten häufig weniger effektiv oder es handelt sich beim Substitut – wie z.B. in der Beleuchtungstechnologie – wiederum um Seltene Erden (Roskill Information Service 2007, zitiert nach Wäger/Lang 2010). Beim Handlungsansatz der Substitution geht es bei diesen Rohstoffgruppen daher vor allem um die Substitution von Primärmaterialien durch Sekundärmaterialien, was Gegenstand des Kapitels 5.3 (Ressourceneffiziente Abfall- und Kreislaufwirtschaft) ist.

Auswirkungen der Instrumente auf die Ressourcen Boden/Fläche, Wasser, Atmosphäre, Biodiversität

Die Substitution von abiotischen, nicht-energetischen Rohstoffen durch biotische Rohstoffe hat Auswirkungen auf die Ressourcen Fläche, Wasser, Atmosphäre und Biodiversität. So kann die vermehrte Nutzung von Biomasse zu Landnutzungskonkurrenzen führen. Bei der in der Öffentlichkeit ausgetragenen „Tank oder Teller“- Diskussion geht es vor allem um die Nutzungskonkurrenz in der Fläche zwischen der Nahrungsmittelproduktion und der energetischen Nutzung von biotischen Rohstoffen (Faulstich et al. 2012). Ein Fünftel der ca. 12 Millionen Hektar Ackerfläche in Deutschland werden bereits für den stofflichen und energetischen Biomasseanbau genutzt. Die stoffliche Nutzung biotischer Rohstoffe machte davon 2011 in Deutschland jedoch nur 14% im Vergleich zu 86% energetischer Nutzung aus (Faulstich et al. 2012). In der Forstwirtschaft wurden ca. 40% energetisch und knapp 60% stofflich genutzt (Mantau 2009).

Bei der Substitution im Baubereich liegen keine Daten vor, inwieweit die Nutzung von biotischen Rohstoffen mit einer höheren (oder niedrigeren) Flächennutzung im Vergleich zur durch den Abbau von Baumineralien oder Metallen nötigen Fläche einhergehen würde. Bei einem Vergleich müsste auch der beim Abbau von fossilen Energieträgern (die wiederum für die Herstellung von z.B. Zement und Stahl nötig ist) entstehenden Flächenverbrauch mit eingerechnet werden.

Indirekte Effekte sind durch die vermehrte Biomasseproduktion für die stoffliche Nutzung auch auf Böden (durch Düngemiteleinsatz) sowie Wasserqualität anzunehmen. Bei Landnutzungsänderungen kann es zudem zu Treibhausgasemissionen kommen, bzw. die Funktion von Böden als CO₂ Speicher eingeschränkt werden.

Maßnahmen zur RE-Steigerung in der Produktion und ihre *direkten* Wirkungen auf die Ressourcentypen

Anmerkung: die Tabelle dient dem Überblick – die darin enthaltenen Pfeile stellen Tendenzen dar; tatsächlich sind die Wirkungen in hohem Maße von Bedingungen abhängig und die Pfeile für Einzelfälle daher zu hinterfragen.

Wirkung auf den Nutzung von:	Mas- sen- metal- le (pri- mär)	„kriti- sche“ Rohstof- fe (v.a. Seltene Erden)	Bau- mine- ralien	Indust- riemi- nera- lien (inkl. Phos- phor)	Ener- gie- träger (fossile und Kern- brenns t.)	Biomasse		Wasser	Fläche und Boden	Biodiv	Atmo- sphäre
Maßnahme						Stoffl	Energ.				
Ressourcen- effizienzsteiger- ung in der Produktion	↓				↓	↓		↓	↓	↓	↓
Substitution und neue Werkstoffe	↓		↓	↓↑	↓	↑	↔	↓↑	↓↑	↓↑	↓↑

* die Umweltbilanz von Biomasse hängt maßgeblich von den Anbautechniken und Transportwegen ab.

** Die Doppelpfeile bedeuten: Substitution kann je nachdem, was wodurch in welchem Umfang substituiert wird und je nach Anbaumethoden und Verlagerungseffekten positiv oder negativ wirken.

5.2. Ziel: Ressourceneffizienten Konsum fördern

Die ressourceneffizientere Gestaltung des Konsums wird in ProgRess als ein übergeordnetes Thema aufgenommen, unter dem sich mehrere Handlungsansätze gruppieren lassen (Deutsche Bundesregierung, 2012a: 42). Insgesamt geht es darum, Konsumbedürfnisse mit einem möglichst geringen Ressourcenaufwand zu befriedigen. Neben der Suffizienz, d.h. dem Verzicht auf Konsum oder der Intensivierung der Nutzung von Produkten (durch gemeinschaftliche Nutzung oder die Verlängerung der Nutzungszeit), kann auch die Nutzung technischer ressourceneffizienterer Innovationen gefördert werden.

Zu den Maßnahmen, die einen ressourceneffizienten Konsum befördern sollen, gehören die Schaffung eines entsprechenden Bewusstseins, die Etablierung der Ressourceneffizienz als ein Kriterium für den Handel und die Konsumentinnen und Konsumenten (hier z.B. auch neue Nutzungskonzepte), die Verlängerung der Nutzungsdauer von Produkten, die Einführung und Nutzung vorhandener Zertifizierungssysteme für Rohstoffe sowie die Nutzung des Instruments der öffentlichen Beschaffung (Deutsche Bundesregierung, 2012a, Handlungsansätze 8-11).

Bei den erwähnten Instrumenten sind Wirkungen auf das Verhalten bzw. wie dieses sich auf die Ressourcennutzung auswirkt, schwer abzuschätzen. Insgesamt scheint es plausibel, dass der Konsum von ressourceneffizienten Produkten eine senkende Wirkung auf den Einsatz fossiler Energieträger und den Ausstoß von THG hat, weil es zu einer Reduktion der Nutzung von Primärmaterialien kommt. Allerdings muss dies für die einzelnen Maßnahmen analysiert werden. Nachfolgend wird exemplarisch die potenzielle Wirkung zweier Instrumente auf die ProgRess Ressourcen sowie die Ressourcen der Energiewende dargestellt. Wie zuvor werden auch die Auswirkungen auf die anderen natürlichen Ressourcen kurz diskutiert.

5.2.1. Ansätze zur Erhöhung der Nutzungsintensität: Das Beispiel neue Nutzungskonzepte

Auswirkungen der Instrumente auf ProgRess-Rohstoffe und Energieträger

Alternative Nutzungskonzepten, bei denen Produkte getauscht, geteilt und geliehen werden, können durch die intensivere Nutzung von Konsumgütern und Dienstleistungen die Ressourcenproduktivität erhöhen und/oder in einem veränderten Nachfrageverhalten resultieren (Scholl et al. 2013). Sowohl mit der Nutzungsintensivierung als auch durch verändertes Nachfrageverhalten können positive sowie negative Effekte auf die Ressourcennutzung einhergehen. Das bekannteste Beispiel, das CarSharing kann, wenn die geteilte Nutzung tatsächlich die Anschaffung eines Privatautos verhindert, zu einem verminderten Einsatz von Rohstoffen führen und entsprechend auch zu einem geringeren Bedarf an energetisch genutzten Rohstoffen, die für die Herstellung des Autos notwendig sind. Auf Grund der größeren Kostentransparenz können CarSharing-Angebote auch zu einer geringeren Kilometerleistung pro Jahr führen (Scholl et al. 2013). Jedoch können Vermietungsangebote auch zusätzlichen Konsum provozieren, wenn das CarSharing Angebot als Zweit- oder Drittwagen genutzt wird oder als Vorstufe zum Güterkauf den Zugang zum Güterkonsum erst ermöglichen (Scholl et al. 2013; Scholl 2012). Scholl et al. weisen in ihrer Studie auch auf indirekte Rebound-Effekte hin, wenn die im Zuge der alternativen Nutzung eingesparten finanziellen Ressourcen für andere umweltverbrauchende Zwecke verwendet werden (Scholl et al. 2013). Wie eingangs erwähnt können diese jedoch nicht analysiert werden, da die Datengrundlage hierfür fehlt.

Die Weiterverwendung von Produkten (z.B. Second Hand) hat bei der Mehrzahl der Produkte, vom Fahrradkindersitz bis zur Wohnzimmerschrankwand, sowohl in stofflicher wie energetischer Ressourceneffizienz klare Vorteile gegenüber der Entsorgung oder des Neukaufs. Allerdings spielt letztlich das individuelle Nutzungsverhalten eine große Rolle für die Bilanz: trägt die Weiterverwendung dazu bei, dass der Kauf von neuen Produkten reduziert wird oder wird erst eine zusätzliche Nachfrage generiert? Bei energieverbrauchenden Produkten kann die Nutzung von Gebrauchtgegenständen im Vergleich zur Anschaffung eines Neugeräts mit einem größeren Energiebedarf einhergehen (beispielsweise bei Kühlschränken). Nicht zu vernachlässigen sind auch die durch den Versand von Gebrauchtwaren (z.B. über ebay) entstehenden THG-Emissionen durch den Transport (Dalichau et al. 2010: 32).

Auswirkungen der Instrumente auf die Ressourcen Boden/Fläche, Wasser, Atmosphäre, Biodiversität

Wenn man davon ausgeht, dass neue Nutzungskonzepte dazu führen, dass absolut weniger neue Produkte angeschafft werden, hat dies auch auf die Ressourcen Boden/Fläche, Wasser, Atmosphäre und Biodiversität eine positive Wirkung (Schonung der Ressourcen).

5.2.2. Ansätze zur Förderung effizienter Produkte: Das Beispiel ressourceneffiziente öffentliche Beschaffung

Auswirkungen der Instrumente auf ProgRess-Rohstoffe und Energieträger

Bei dem aus der Perspektive der Ressourcennutzung besonders relevanten Bereich des Bauens ist ein – bei Neubauten von Büro- und Verwaltungsbauten des Bundes verpflichtendes – Gütesiegel Nachhalti-

ges Bauen vorhanden (BMVBS 2011). Durch das Gütesiegel wird das Gebäude in seinem gesamten Lebenszyklus von der Planung bis hin zum Recycling bewertet. Eine senkende Wirkung auf die Nutzung der in ProgRess adressierten Rohstoffe kann durch die Kriterien im Themenfeld Ökologische Qualität erwartet werden: eine gute Bewertung in diesem Bereich ist u.a. durch die Verlängerung der Nutzungsdauer von Produkten, Baukonstruktionen und Gebäuden sowie dem Einsatz wiederverwertbarer oder -verwendbarer Bauprodukte zu erreichen (BMVBS 2011). Im Themenfeld Technische Qualität wird für eine gute Bewertung auf die Kriterien Rückbaubarkeit, Recyclingfreundlichkeit und Demontagefreundlichkeit geschaut (Bauer et al., 2011; BMVBS 2011). Mit dem Gütesiegel Nachhaltiges Bauen wird entsprechend die ressourceneffiziente Nutzung von Baumaterialien gefördert – wenn auch derzeit nur auf Büro- und Verwaltungsgebäude des Bundes beschränkt – weshalb entsprechend von einer senkenden Wirkung auf die Energieressourcen ausgegangen werden kann.

Weitere relevante Beschaffungsvorgänge der öffentlichen Verwaltung, mit denen ProgRess-Ressourcen geschont werden können, sind die Beschaffung von Recyclingpapier sowie die Beschaffung von Dienstwagen.

Bei Recyclingpapier ist zwar das Trennen von Holzfasern von Lignin und anderen Holzbestandteilen durchaus energieaufwendig, dennoch schneidet das Recyclingpapier in der Umweltbilanz gegenüber herkömmlichen Papier besser ab – d.h. der Energiebedarf der Zellstoffherstellung aus Holz ist deutlich höher als der zur Altpapieraufbereitung (Uli Gromke & Detzel, 2006: 2).

Bei der Beschaffung von ressourcenleichten Dienstwagen (oder anderer Mobilitätsdienstleistungen, z.B. CarSharing für die Verwaltung) ist ebenfalls von einer Synergie mit den Zielen der Energiewende auszugehen. Die Beschaffung von Fahrzeugen, entweder als Dienstfahrzeuge für Behörden oder im ÖPNV, stellt laut McKinsey&Company einen wesentlichen Teil des öffentlichen Beschaffungswesens dar (5,1 Mrd. EUR, 2008: 45). Mit der Herstellung und dem Betrieb von Pkws ist auch ein erheblicher Ressourcenaufwand verbunden, der zwischen den Fahrzeugtypen variiert (Sand et al. 2007). Durch CarSharing in der öffentlichen Beschaffung würden insgesamt weniger Pkws angeschafft und somit die für die Herstellung nötigen Ressourcen eingespart (vgl. auch Münch/Jacob 2013; G. Scholl et al., 2013: 11f).

Auswirkungen der Instrumente auf die Ressourcen Boden/Fläche, Wasser, Atmosphäre, Biodiversität

Als Kriterien für die Bewertung im Rahmen des Gütesiegels Nachhaltiges Bauen wird auch flächensparendes Bauen berücksichtigt (BNB 1.2.4). Diese beschränkt sich aber auf das (Bau)Grundstück, d.h. Flächen für die Gewinnung von Rohstoffen oder Produktionsstätten werden nicht berücksichtigt (ebd.). Wie in Kapitel 5.1.2 dargestellt hat auch die Nutzung von biotischen Rohstoffen als Substitut für Baumaterialien oder Stahl Auswirkungen auf Wasser, Fläche, Atmosphäre und Biodiversität.

Sowohl beim Einsatz von Recyclingpapier sowie beim CarSharing kann davon ausgegangen werden, dass dies eine schonende Wirkung auf die natürlichen Ressourcen Boden/Fläche, Wasser, Atmosphäre und Biodiversität hat, da jeweils weniger Primärrohstoffe genutzt werden.

Maßnahmen zur Förderung des ressourceneffizienten Konsums und ihre direkten Wirkung auf die Ressourcentypen

Anmerkung: die Tabelle dient dem Überblick – die darin enthaltenen Pfeile stellen Tendenzen dar; tatsächlich sind die Wirkungen in hohem Maße von Bedingungen abhängig und die Pfeile für Einzelfälle daher zu hinterfragen.

Wirkung auf die Nutzung von:	Massenmetalle (primär)	„kritische“ Rohstoffe (v.a. Seltene Erden)	Baumineralien	Industriemineralien (inkl. Phosphor)	Energieträger (fossile und Kernbrennstoffe)	Biomasse		Wasser	Fläche und Boden	Biodiversität	Atmosphäre
Maßnahme						Stoffl.	Energ.				
z.B. neue Nutzungskonzepte*	↓	↓			↓						
z.B. Öffentliche Beschaffung (nachhaltiges Bauen)	↓		↓	↓		↑	✗				
z.B. Öffentliche Beschaffung (CarSharing*)	↓	↓			↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
z.B. Öffentliche Beschaffung (Recyclingpapier)	↓	↓			↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓

*) unter der Annahme das weniger Produkte gekauft werden bzw. keine zusätzlichen Fahrten induziert werden bzw. keine Verlagerung vom ÖPNV/Fahrrad auf PKW stattfindet.

5.3. Ziel: Ressourceneffiziente Abfall- und Kreislaufwirtschaft ausbauen²⁴

Ein weiteres Ziel der Ressourceneffizienzpolitik ist die Vermeidung von Abfall und der Ausbau der Kreislaufwirtschaft, durch die der Bedarf an Primärrohstoffen verringert und negative Umweltwirkungen reduziert werden soll. Hierfür gibt es bereits eine Vielzahl an Gesetzen und Maßnahmen, z.B. Getrennthaltungspflichten für Abfälle, Festsetzung von Produktverantwortung im Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG 2012, Teil 3) inklusive Rücknahmeverpflichtungen für Altprodukte oder die WEEE-Richtlinie (2012/19/EU, Artikel 10) über die Ausfuhr von Elektronikabfällen in Drittstaaten. Hinzu kommen Maßnahmen zur Unterstützung des Aufbaus geeigneter Entsorgungsinfrastrukturen durch Kooperationsangebote, Informationsvermittlung, Technologietransfer etc. (Deutsche Bundesregierung, 2012a: 51), so-

²⁴ Vgl. auch ProgRes (Deutsche Bundesregierung 2012a: 47, 27)

wie das Festsetzen von Recyclingquoten²⁵ oder die Verpflichtung von Anlagenbetreibern zur Abfallvermeidung (BImSchG, § 5 Abs. 1 Nr. 3).

Ziele und Ansatzpunkte bei der Etablierung einer ressourceneffizienten Abfall- und Kreislaufwirtschaft lassen sich anhand der Abfallhierarchie (KrWG 2012 §6) strukturieren: 1) Vermeidung von Abfall²⁶, 2) Förderung der Wiederverwendung von Altprodukten und Komponenten²⁷, 3) Rückführung der in Abfällen enthaltenen sekundären Rohstoffe in den Wertstoffkreislauf und Recycling²⁸, 4) die Verringerung des Anteils der energetischen Verwertung²⁹ sowie 5) Vermeidung der Beseitigung und Deponierung von Abfallstoffen.

Auswirkungen der Instrumente auf ProgRess-Rohstoffe und Energieträger

Ein Ziel der Kreislaufwirtschaft ist es, trockene Wertstoffe (Metalle, Kunststoffe, Glas, Papier) und Bioabfälle wieder so aufzubereiten, dass sie als Substitut für Primärrohstoffe genutzt werden können. Für die trockenen Wertstoffe Glas, Papier und Metalle ist das Recycling (stoffliche Verwertung vor sonstigen Verwertungsarten) technisch weniger aufwendig und ökonomisch rentabel. Zwar ist auch die Recyclingindustrie energieintensiv, jedoch gilt für die meisten Rohstoffarten, dass der Energiebedarf geringer ist als bei der Herstellung von Primärmaterial. Dies veranschaulichen die folgenden Tabellen:

²⁵ Bis 2020 für Siedlungsabfälle insgesamt eine Recyclingquote von mindestens 65% (statt der EU-Vorgabe von 50% für Papier, Metall, Kunststoff und Glas (AbfRRL 2008) sowie für Bau- und Abbruchabfälle eine stoffliche Verwertungsquote von mindestens 70% (§ 14 KrWG)

²⁶ Ansatzpunkt: Schaffung von Anreizstrukturen für Hersteller und Konsumenten zur Herstellung/Kauf von ressourcenleichten Produkten

²⁷ Ansatzpunkt: Verlängerung der Nutzungsdauer von Produkten

²⁸ z.B. durch Recycling- und Verwertungsquoten; Ansatzpunkte: u.a. bessere Erfassung von Siedlungsabfällen und Altgeräten für das Recycling, recyclingfreundliche Gestaltung von Produkten, Verbesserung der Nachfragesituation für Sekundärrohstoffe, Verbesserung der Recyclingtechnologie, insbesondere im Hinblick auf die Rückgewinnung von Kleinstmengen.

²⁹ Ansatzpunkt: Kaskadennutzung bei biotischen Rohstoffen

Tabelle 3: Energieeinsparung durch Recycling bei unterschiedlichen Eisen- und Nichteisenmetallen (Bandbreiten)

Table 4.4 Ranges of energy savings of recycling for various ferrous and non-ferrous metals.

Metal/Product	% Savings	References
Aluminium	90-97	Kellogg (1977), Norgate & Rankin (2002), Gaballah and Kanari (2001), Quinkert <i>et al.</i> (2001), International Aluminium Institute (2011), Chapman and Roberts (1983)
Copper	84-88	Norgate and Rankin (2002), Gaballah and Kanari (2001)
Gold	98	ecoinvent v2.2
Lead	55-65	Norgate and Rankin (2002), Gaballah and Kanari (2001)
Magnesium	97	Kellogg (1977)
Nickel	90	Kellogg (1977), Norgate and Rankin (2002)
Palladium	92-98	ecoinvent v2.2
Platinum	95	ecoinvent v2.2
Rhodium	98	ecoinvent v2.2
Silver	96	ecoinvent v2.2
Steel	60-75	Norgate and Rankin (2002), Gaballah and Kanari (2001)
Stainless Steel (304)	68	Johnson <i>et al.</i> (2008), Eckelman (2010)
Titanium	67	Chapman and Roberts (1983)
Zinc	60-75	Norgate and Rankin (2002), Gaballah and Kanari (2001)

Adapted from Norgate (2004)

Quelle: UNEP, 2013, p. 86

Tabelle 4: Carbon Footprint and Savings in Kilotonnes of CO₂.

Carbon Footprint and Savings Expressed in Kilotonnes of CO₂ (ktCO₂)/100,000 Tonnes

Material	Primary	Secondary	Saving/100,000 Tonnes (% savings CO ₂ in parentheses)	
Aluminium	383	29	354	(92%)
Copper	125	44	81	(65%)
Ferrous	167	70	97	(58%)
Lead	163	2	161	(99%)
Nickel	212	22	190	(90%)
Tin	218	3	215	(99%)
Zinc	236	56	180	(76%)
Paper	0.17	0.14	0.03	(18%)

Quelle: Bureau of International Recycling, 2008.

Auch wenn die angeführten Angaben zu CO₂-Minderungspotentialen des Recyclings nicht in allen Fällen deckungsgleich sind, zeigen sie einen eindeutigen Trend: Die Nutzung von Recyclingmaterial anstelle von Primärmaterial weist für Metalle (und auch Papier) ein erhebliches CO₂-Minderungspotential auf. Jedoch ist darauf hinzuweisen, dass sich Recyclingpfade und -technologien teilweise erheblich in ihrem Energie- und stofflichen Ressourcenaufwand und damit den im Vergleich zur Primärroute eingesparten Ressourcen unterscheiden.

Laut einer Szenariorechnung – bei der Optimierungen bei der Getrenntsammlung, Sortierung und Aufbereitung angenommen wurden – kann der Wert an Sekundärrohstoffen (2011: 20 Mio. Megagramm

(Mg³⁰) inklusive Kompost) bis zum Jahr 2030/2050 auf über 23 Mio. Mg gesteigert werden (Dehoust et al. 2014, 53–54). Durch den Verzicht auf Primärrohstoffe, durch die Gewinnung und Nutzung von Ersatzbrennstoffen sowie durch die Abkehr von der Deponierung unbehandelter Abfälle könnten somit die Emission klimarelevanter Gase (v.a. Methanemissionen) verringert werden (Dehoust et al. 2005); G. Dehoust, Schüler, Vogt, & Giegrich, 2010; (Dehoust et al. 2014). Die potenziellen Emissions-Einsparungen durch die Kreislaufwirtschaft wird für 2030 und 2050 mit knapp 31 Mio. Mg CO₂eq/Jahr angegeben (Dehoust et al. 2014, 53). Dies entspricht etwa 20 Prozent der Emissionen des Verkehrssektors im Jahr 2011 (ebd.).

Nichteisenmetalle wie Aluminium und Kupfer können als Sekundärrohstoffe auch aus MV-Schlacke³¹ zurück gewonnen werden (Deike et al. 2012: 8). So ließen sich 17.000 Tonnen Nichteisenmetalle wie Aluminium und Kupfer pro Jahr zusätzlich gewinnen (Alwast and Riemann 2010: XI). Insgesamt ist hier von einem Minderenergieeinsatz aufgrund der vermiedenen Neuproduktion von Metallen auszugehen, wobei ein möglicher Energieeinsatz für die Verbesserung der Schlackeaufbereitung den energetischen Vorteil durch eine bessere Rückgewinnung von Metallen wieder (teil-)kompensieren kann (Alwast and Riemann 2010: 3). So ist beispielsweise das Recycling von Stahlschrott weniger energieaufwendig als das Recycling von z.B. Seltenen Erden, da die Metalle bei ersterem hoch konzentriert vorliegen (Deike et al. 2012: 13). Deike et al. sprechen hier von hoher oder niedriger Entropie, die sie als Maß für die Verteilung eines Stoffes definieren - je geringer die Entropie in der Abfallphase (d.h. je höher die Konzentration des Stoffes), desto geringer sind auch die Kosten und Energieaufwände zur Wiedergewinnung des Produktes (ebd.).

Unter anderem durch den Trend der Miniaturisierung in der Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) werden insbesondere kritische Rohstoffe in kleinstmengen eingesetzt, was zu Problemen beim Recycling führen kann (Woidasky/Hirth 2012). Die langfristigen Potenziale für das Recycling von Seltenen Erden würden jedoch die Investition in Recyclingtechnologien lohnen (Rademaker et al. 2013). So könnten z.B. bei Neodym und Dysprosium – die in Computern und im Bereich der erneuerbaren Energien Einsatz finden – im Jahr 2030 9% bzw. 7% des weltweiten Bedarfs durch Recycling gedeckt werden (ebd.). In der oben bereits erwähnten Szenarioberechnung zum Beitrag der Kreislaufwirtschaft für die Energiewende, bei der von einer getrennten Erfassung und Verwertung von 120.000 Mg/Jahr Elektrokleingeräten (knapp 1,5 kg/Einwohner bei ca. 81 Mio. Einwohner) ausgegangen wird, werden die eingesparten Emissionen durch die eingesparte Primärherstellung der recycelten Grundmetalle mit etwa 2.600 kg CO₂eq/Mg Elektrokleingeräte angegeben (Dehoust et al., 2005, 2014: 31).

Bei mineralischen Bauabfällen gestaltet sich die Lage anders: sie werden heute nahezu vollständig wiederverwertet. Allerdings findet die Wiederverwertung vor allem im Straßenbau statt, weshalb im Baube-

³⁰ 1.000 kg = 1.000.000 g

³¹ MV-Rohschlacken: Unter MV-Rohschlacken werden die Rückstände aus der Verbrennung von Hausmüll und hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen verstanden, die am Ende des Rostes den Feuerraum verlassen. Unter MV-Schlacken werden aufbereitete MV-Rohschlacken verstanden (Deike et al. 2012: 8).

reich nach wie vor eine große Menge an Primärbaumaterialien eingesetzt wird – lediglich ca. 15 Prozent des Bedarfs an primärer Gesteinskörnung werden durch Recycling-Baustoffe gedeckt (BGR 2013: 23).

In einer Studie, die im Auftrag des Bundesverband Baustoffe durchgeführt wurde, wird die zukünftigen Nachfrage nach Steine-Erden-Rohstoffen bis 2030 in zwei Szenarien abgeschätzt sowie das Substitutionspotenzial durch Sekundärrohstoffe untersucht. Die Autoren kommen zu dem Ergebnis, dass die hohe Verwertungsquote bei den Baurestmassen nur noch geringfügig zu steigern sei (Schwarzkopp et al. 2013: 2). Durch die Energiewende, die zu einem geringeren Aufkommen an Kraftwerksnebenprodukten (Schlacke) führt, sinke die relative Bedeutung der Sekundärrohstoffe (Substitutionsquote) sogar leicht – von 14,9% in 2010 auf 13,4% bis 13,9% in 2030 (Schwarzkopp et al. 2013: 2).

Hinsichtlich des Energiebedarfs (Graue Energie) unterscheidet sich Recyclingbeton jedoch kaum von konventionellem Beton, da die Aufbereitung von Betongranulat, Mischabbruchgranulat und Recyclingkiessand einen vergleichbaren Energieaufwand wie die Gewinnung und Aufbereitung von Primärzuschlag (Sand, Kies, Zement) erfordert (Econum GmbH, 2003). Aus Ressourceneffizienzperspektive wird das Recycling von Beton vor allem zur Schonung begrenzter Kiesressourcen gefördert. Energetische Vorteile bzw. eine Senkung der Emissionen ergeben sich, wenn mit der Verwendung von Recyclingbeton eine Verkürzung der Transportwege einhergeht (Heyn and Mettke 2010: 79). In Gebieten mit einer geringen Dichte an Primärbaumineralien ist die Verwendung von Recyclingbeton somit auch aus der Perspektive der Energiewende sinnvoll. Andersherum gilt dann entsprechen: sind mit der Nutzung von Recyclingbeton längere Transportwege verbunden, als mit dem Abbau von Primärbaumineralien, ist es zumindest aus Perspektive der Schonung von Energieressourcen und CO₂-Emissionen kein unmittelbarer Vorteil.

Neben der stofflichen Nutzung (Kompost) kann durch die Getrenntsammlungspflicht für Bioabfälle aus organischen Abfallbestandteilen auch hochwertig aufbereitetes Gas in Erdgasqualität zur Verfügung gestellt werden. Die fossile Stromerzeugung kann somit reduziert werden, indem Gase und Festbrennstoffe aus Abfall genutzt werden. Auch der Anteil an Biomasse, die für die energetische Nutzung extra angebaut wird, kann durch die Nutzung von abfallbasierten Ersatzbrennstoffen reduziert werden (Dehoust et al. 2014, vgl. auch Kap. 4.2.3). Die Kreislaufwirtschaft kann laut Dehoust et al. im Jahr 2050 durch die Bereitstellung von flexibler Reservekapazität einen Beitrag von 10% zur flexibel steuerbaren Stromerzeugung leisten (2014).

Selbst beim Kunststoffrecycling (stofflich genutzte fossile Rohstoffe), welches einen hohen Aufwand zur Getrennthaltung oder Sortierung und Aufbereitung von Kunststoffen erfordert, ist laut Öko-Institut im Vergleich zur energetischen Nutzung ein Beitrag zur Emissionsvermeidung verbunden (Dehoust et al. 2014, 23)³². „Da bei Kunststoffen als fossilem ‚Brennstoff‘ der gesamte Anteil der CO₂-Emissionen kli-

³² Laut Daten von Destatis wurden etwa 3,5 Mio. Mg aus den Post Consumer-Abfällen in Müllverbrennungsanlagen (MVA) verbrannt und nur 1,6 Mio. Mg recycelt (Dehoust et al., 2014: 25).

mawirksam ist“ (Dehoust et al. 2014: 26) werden mehr Emissionen freigegeben, als durch den eingesparten Strom und die eingesparte Wärme vermieden werden.

Zwar lassen sich Kunststoffe nicht unendlich recyceln, da jeder Recyclingvorgang mit Qualitätsverlusten einhergeht, jedoch wird angenommen, dass der Beitrag zum Klimaschutz durch Kunststoffrecycling in Zukunft noch deutlich gesteigert werden kann (Dehoust et al. 2014).

Auswirkungen der Instrumente auf die Ressourcen Boden/Fläche, Wasser, Atmosphäre, Biodiversität

Bei einer Kreislaufführung von Materialien werden insgesamt weniger Primärmaterialien abgebaut, weshalb auch bei den Ressourcen Boden/Fläche, Wasser, Atmosphäre und Biodiversität von einer positiven Wirkung (Schonung der Ressourcen) ausgegangen werden kann.

Maßnahmen zum Ausbau der ressourceneffizienten Abfall- und Kreislaufwirtschaft und ihre direkten Wirkung auf die Ressourcentypen

Anmerkung: die Tabelle dient dem Überblick – die darin enthaltenen Pfeile stellen Tendenzen dar; tatsächlich sind die Wirkungen in hohem Maße von Bedingungen abhängig und die Pfeile für Einzelfälle daher zu hinterfragen.

Wirkung auf den Verbrauch:	Massenmetalle (primär)	„kritische“ Rohstoffe (v.a. Seltene Erden)	Baumineralien	Industriemineralien (inkl. Phosphor)	Energieträger (fossile und Kernbrennst.)	Biomasse		Wasser	Fläche und Boden	Atmosphäre
Maßnahme						Stoffl.	Energ.			
Recycling und KrW	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓

5.4. Zwischenfazit zu Kapitel 5

Bei der Frage nach den Auswirkungen der Ressourceneffizienzpolitik auf die Politik der Energiewende wurde von drei zentralen Ansätzen der Ressourceneffizienz ausgegangen: Ressourceneffizienzsteigerung in der Produktion (inklusive ressourceneffizienter Produkte und Dienstleistungen), Förderung eines ressourcenleichten Konsum sowie Ausbau der Abfall- und Kreislaufwirtschaft.

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass aus der Wirkrichtung der Ressourceneffizienzpolitik überwiegend Synergien mit den Zielen der Energiewende zu erwarten sind. Die Verbesserung der Ressourceneffizienz zielt auf ein „Weniger“ an (Primär-)Rohstoffeinsatz ab, was entsprechend mit einem „Weniger“ an Energieeinsatz – und damit Emissionen – verbunden ist.

Das Gleiche gilt für die Auswirkungen auf die Ressourcen Boden/Fläche, Wasser, Atmosphäre und Biodiversität. Wenn weniger Rohstoffe genutzt werden, führt dies grundsätzlich auch zu einer Schonung der natürlichen Ressourcen.

Allerdings gibt es auch potenzielle Konflikte zwischen beiden Politikfeldern. Hier hat sich vor allem die stoffliche Nutzung von biotischen Rohstoffen als zentral herausgestellt. Sie weist hohe Potentiale für die Substitution von als problematisch wahrgenommenen Materialien auf („neue Werkstoffe“). Die Nutzung von biotischen anstelle von abiotischen Rohstoffen scheint zunächst, nicht nur mit Blick auf die Begrenztheit von abiotischen Rohstoffen, sondern auch mit Blick auf die Energiebilanz als nachhaltige Alternative. Der Einsatz von biotischen Rohstoffen bringt in der Regel einen verminderten Einsatz von Energieträgern mit sich.

Jedoch wird deutlich, dass die indirekten Effekte der Substitution von abiotischen durch biotische Rohstoffen bislang nicht ausreichend beleuchtet sind. Die tatsächliche Umweltbilanz hängt vor allem von Anbaumethoden und Transportwegen des biotischen Materials ab. Dabei muss vor allem berücksichtigt werden, dass die Fläche für biotische Rohstoffe eine begrenzte Ressource darstellt und Nutzungskonkurrenzen zwischen der stofflichen und der energetischen Nutzung von Biomasse entstehen können. Bei Landnutzungsänderungen kann es zudem zu Treibhausgasemissionen kommen und die Funktion von Böden als CO₂-Speicher eingeschränkt werden. Zudem kann der verstärkte Anbau von nachwachsenden Rohstoffen negative Auswirkungen auf die Qualität der Ressourcen Boden, Wasser, und Biodiversität haben. Ein Lösungsansatz kann hier in der Förderung der Kaskadennutzung von biotischen Rohstoffen liegen.

Da Ressourcenverbräuche im gesamten Produktlebensweg – von der Werkstoffherstellung bis zur endgültigen Entsorgung – entstehen, ist eine prozess- und lebensphasenübergreifende Betrachtung nötig. Nur so kann sichergestellt werden, dass eine Optimierung der Ressourceneffizienz eines Prozesses in einer Lebensphase nicht zu einer Verschlechterungen in anderen Lebensphasen und in der Gesamtbilanz führt³³.

³³ Verbesserungen der Rohstoff- oder Energieeffizienz können zur Verschlechterung anderer Umweltindikatoren, wie Toxizitätspotenzial oder Versauerung, führen, auch hieraus resultiert die Notwendigkeit einer umfassenden Bewertung (VDI ZRE Website n.d.). Dies ist aber nicht Gegenstand der vorliegenden Analyse.

6. Fazit und weiterer Forschungsbedarf:

Eine Betrachtung des Nexus zwischen dem Politikfeld der Energiewende und der Ressourceneffizienzpolitik zeigt auf, dass es sowohl Konflikte als auch Synergien gibt. Besonders vor dem Hintergrund der Weiterentwicklung des deutschen Ressourceneffizienzprogramms (ProgRess) ist diese Betrachtung der Schnittstellen von Bedeutung. Die Untersuchung orientiert sich an der Leitfrage, welche Auswirkungen die jeweiligen Politiken auf die unterschiedlichen Ressourcen-Kategorien haben. Ausgehend von Zielen und Instrumenten des jeweiligen Handlungsfeldes wurden deren Wirkungen systematisch mit der Methode der Wirkungskettenanalyse auf die Ressourcengruppen untersucht.

Aus der Wirkrichtung der Energiewende auf die Ressourcen der Ressourceneffizienzpolitik sind zunächst durchaus trade-offs zu finden. So ist der Umstieg auf erneuerbare Energien zunächst mit einem erhöhten Rohstoffbedarf verbunden. Zu nennen sind hier Bedarfe für den Kraftwerksbau und die entsprechende Infrastruktur. Allerdings fehlen Informationen über die Auswirkungen des Ausbaus der erneuerbaren Energien auf den bestehenden Kraftwerkspark. Sofern konventionelle Kraftwerke durch erneuerbare ersetzt werden bzw. deren Neubau vermieden wird, ergibt sich ein vermindernder Effekt auf die Rohstoffnutzung. Dieser müsste in die Untersuchung aufgenommen werden – sonst weist die Rohstoffbilanz der Energiewende (ebenso wie weite Teile der öffentlichen Diskussion) hier einen Bias auf. Generell wird der zusätzliche Rohstoffaufwand in der Nutzungsphase in der Regel überkompensiert.

Aus der Wirkrichtung Ressourceneffizienz auf die Ressourcen der Energiewende wird deutlich, dass eine Erhöhung der Ressourceneffizienz in den meisten Fällen synergetisch mit den Zielen der Energiewende ist, zum Beispiel wenn Materialien im Kreislauf geführt werden oder Prozesse so optimiert, dass weniger Material benötigt wird.

In beiden Handlungsfeldern ist die Nutzung von Biomasse ein zentrales Motiv, sowohl als Energieträger als auch als Substitut für abiotische Rohstoffe. Hier sind vor allem indirekte Effekte auf Boden/Fläche, Wasser, Atmosphäre und Biodiversität im In- und Ausland von zentraler Bedeutung.

Insgesamt lassen sich überwiegend Synergien zwischen den Zielen der Ressourceneffizienzpolitik und der Energiewende feststellen. Dies gilt vor allem, wenn der gesamte Lebenszyklus von Produkten (Beispiel Leichtbau, Windenergie) und auch die indirekten Auswirkungen der Rohstoffnutzung auf die Ressourcen Boden/Fläche, Wasser, Atmosphäre und Biodiversität im In- und Ausland berücksichtigt werden. Synergien werden allerdings nur dann richtig deutlich, wenn stoffliche und energetische Ressourcen auf der Basis einer vergleichbaren Einheit bemessen werden (z.B. RMI³⁴ oder TMR-Äquivalente).

Insoweit Konflikte zwischen den beiden umweltpolitischen Handlungsfeldern erkennbar wurden, seien es bei der Ausweitung von Dämmmaterialien, des Zubaus von Kapazitäten zur Stromerzeugung, oder der Nutzung von kritischen Rohstoffen, wird in der Literatur auch auf Möglichkeiten verwiesen trade-offs zu minimieren insbesondere durch recyclinggerechte Konstruktion.

³⁴ RMI = Raw Material Input. Ausführliche Darstellungen der ressourcenpolitischen Indikatoren und der Debatte dazu finden sich in Bringezu/Schütz 2013 und in Jacob et al. 2014.

Literatur

- AG Energiebilanzen*, 2013: Bruttostromerzeugung in Deutschland von 1990 bis 2013 nach Energieträgern,, abrufbar unter: http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=20131220_brd_stromerzeugung1990-2013.pdf.
- AG Energiebilanzen*, 2014: Ausgewählte Effizienzindikatoren zur Energiebilanz Deutschland,, abrufbar unter: <http://www.ag-energiebilanzen.de/38-0-Effizienzindikatoren.html>.
- Alexandratos, Nikos/Bruinsma, Jelle*, 2012: World Agriculture towards 2030 / 2050. The 2012 Revision, Rome, abrufbar unter: [http://environmentportal.in/files/file/World agriculture towards 2030.pdf](http://environmentportal.in/files/file/World%20agriculture%20towards%202030.pdf).
- Alwast, Holger/Riemann, Axel*, 2010: Verbesserung der umweltrelevanten Qualitäten von Schlacken aus Abfallverbrennungsanlagen, UBA-Texte 50/2010.
- Angerer, Gerhard/Erdmann, Lorenz/Marscheider-Weidemann, Frank/Scharp, Michael/et al.*, 2009: Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs auf die zukünftige Rohstoffnachfrage ISI-Schrif., Stuttgart.
- Angerer, Gerhard/Marscheider-Weidemann, Frank/Wendl, Matthias/Wietschel, Martin*, 2009: Lithium für Zukunftstechnologien Nachfrage und Angebot unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität, Fraunhofer ISI.
- Bau Info Consult*, 2011: Architektenbefragung zum erwarteten überwiegend verwendeten Baustoff in neu geplanten Wohn- und Nichtwohngebäuden, Düsseldorf.
- Bauer, M./Hausladen, G./Hegger, M./Hegner, D./et al.*, 2011: Nachhaltiges Bauen. Zukunftsfähige Konzepte für Planer und Entscheider, Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag GmbH.
- Becker, Nicole*, 2014: Ressourceneffizienz der Dämmstoffe im Hochbau, Berlin.
- Behrendt, Siegfried/Erdmann, Lorenz/Marwede, Max/Caporal, Sophie*, 2010: Roadmap: Ressourceneffiziente Photovoltaik 2020+.
- Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)*., n.d.: BNB Steckbrief 1.2.4,, abrufbar unter: http://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/BNB_Steckbriefe_Buero_Neubau/aktuell/BNB_BN_124.pdf.
- BGR*, 2013a: Deutschland – Rohstoffsituation 2012 *Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe* (Ed.),, Hannover, abrufbar unter: http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/Rohsit-2012.pdf;jsessionid=48F809EF6962DCE7319588B80FF203C8.1_cid324?__blob=publicationFile&v=7.

- BGR*, 2013b: Energiestudie 2013. Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Hannover, abrufbar unter: http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Downloads/Energiestudie_2013.pdf.
- BImSchG*, n.d.: Bundes-Immissionsschutzgesetz,, abrufbar unter: <http://dejure.org/gesetze/BImSchG/3.html>.
- BMF*, 2012: Dreiundzwanzigster Subventionsbericht. Bericht der Bundesregierung über die Entwicklung der Finanzhilfen des Bundes und der Steuervergünstigungen für die Jahre 2009 - 2012,.
- BMU*, 2013: Erneuerbare Energien in Zahlen. Nationale und internationale Entwicklung. Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit (Ed.),, Berlin, abrufbar unter: http://www.erneuerbare-energien.de/fileadmin/Daten_EE/Dokumente__PDFs_/ee_in_zahlen_bf.pdf.
- BMVBS*, 2011: Leitfaden Nachhaltiges Bauen, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.
- BMVI*, 2014: KfW-Programm “Energieeffizient Sanieren” im Rahmen des CO2 Gebäudesanierungsprogramms des Bundes, abrufbar unter: http://www.bmvi.de//DE/BauenUndWohnen/EnergieeffizienteGebaueude/Gebaueudesanierung/WohngebaeudeEnergieeffizientSanieren/wohngebaeude-energieeffizient-sanieren_node.html, letzter Zugriff am 5.5.2014.
- BMW/BMU*, 2011: Erster Monitoring-Bericht „Energie der Zukunft“, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie / Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit. Berlin, abrufbar unter: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/erster-monitoring-bericht-energie-der-zukunft>.
- Bribián, Ignacio Zabalza/Capilla, Antonio Valero/Usón, Alfonso Aranda*, 2011: Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential, in: Building and Environment 46, 1133–1140.
- Bringezu, Stefan/O’Brien, Meghan/Schütz, Helmut*, 2012: Beyond biofuels: Assessing global land use for domestic consumption of biomass, in: Land Use Policy 29, 224–232, abrufbar unter: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264837711000640>, letzter Zugriff am 13.5.2014.
- Bringezu, Stefan/Schütz, Helmut*, 2013: Ziele und Indikatoren für die Umsetzung von ProgRess, Berlin, abrufbar unter: http://www.ressourcenpolitik.de/wp-content/uploads/2013/04/PolRess_ZB_AP1-1.2-3_Indikatoren-und-Ziele_final.pdf, letzter Zugriff am 11.7.2013.
- Bringezu, Stefan/Schütz, Helmut/Arnold, Karin/Bienge, Katrin/et al.*, 2008: Nutzungskonkurrenzen bei Biomasse Auswirkungen der verstärkten Nutzung von Biomasse im Energiebereich auf die stoffliche Nutzung in der Biomasse verarbeitenden Industrie und deren Wettbewerbsfähigkeit durch staatlich induzierte Förderprogramme,.
- Buchanana, Andrew H./Levine, S. Bry*, 1999: Wood-based building materials and atmospheric carbon emissions, in: Environmental Science & Policy 2, 427–437.

- Buchert, Matthias et al.*, 2011: Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität. Arbeitspaket 7 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen, Darmstadt.
- Bund-Länder-Arbeitsgruppe zur Evaluierung der Düngeverordnung*, 2012: Evaluierung der Düngeverordnung – Ergebnisse und Optionen zur Weiterentwicklung. Abschlussbericht, Braunschweig, im November 2012.
- Bureau of International Recycling*, 2008: Report on the Environmental Benefits of Recycling, Brussels.
- Carus, Michael/Raschka, Achim/Fehrenbach, Horst/Rettenmaier, Nils/et al.*, 2014: Ökologische Innovationspolitik – Mehr Ressourceneffizienz und Klimaschutz durch nachhaltige stoffliche Nutzungen von Biomasse - Langfassung, UBA-Texte | 01/2014, Dessau-Roßlau.
- CDU/CSU/SPD*, 2013: Deutschlands Zukunft gestalten. Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD., abrufbar unter: <https://www.cdu.de/sites/default/files/media/dokumente/koalitionsvertrag.pdf>.
- Cleanenergy Project*, 2013: Umweltschäden durch Neodym in der Windkraft, abrufbar unter: <http://www.cleanenergy-project.de/erneuerbare-energien/item/4301-seltene-erden-in-der-windkraft>, letzter Zugriff am 5.5.2014.
- Dalichau, Dirk/Hattenhauer, Merle/Blättel-Mink, Birgit/Bender, Saskia-Fee*, 2010: Wer nutzt den Online-Gebrauchtmärkte? Umweltorientierte, Prosumenten und andere User auf eBay, in: Forschung Frankfurt 3, abrufbar unter: Dirk.
- Dehoust, Günter/Harthan, Ralph O. /Stahl, Hartmut/Hermann, Hauke/et al.*, 2005: Beitrag der Abfallwirtschaft zum Klimaschutz – Statusbericht zum Beitrag der Abfallwirtschaft zum Klimaschutz und mögliche Potenziale,.
- Dehoust, Günter/Harthan, Ralph O. /Stahl, Hartmut/Hermann, Hauke/et al.*, 2014: Beitrag der Kreislaufwirtschaft zur Energiewende. Klimaschutzpotenziale auch unter geänderten Rahmenbedingungen optimal nutzen,.
- Dehoust, Günter/Schüler, D./Vogt, R./Giegrich, J.*, 2010: Klimaschutzpotenziale der Kreislaufwirtschaft – Am Beispiel von Siedlungsabfällen und Altholz, UBA-Texte 06/2010; Dessau 2010.
- Deike, Rüdiger/Ebert, Dominik/Warnecke, Ragnar/Vogell, Martin*, 2012: Abschlussbericht zum Projekt „Recyclingpotenziale bei Rückständen aus der Müllverbrennung“, Abschlussbericht zum Projekt Recyclingpotenziale bei Rückständen aus der Müllverbrennung.
- DEKRA*, 2011: Mit der Temperatur sinkt die Reichweite. DEKRA untersucht Energiebilanz von Elektroauto, Stuttgart.
- Deutsche Bundesregierung*, 2012a: Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess). Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Beschluss des Bundeskabinetts vom 29.2.2012. *Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit* (Ed.),, Berlin.
- Deutsche Bundesregierung*, 2012b: Nationale Nachhaltigkeitsstrategie: Fortschrittsbericht 2012, Berlin: Bundesregierung.

- Deutsche WindGuard*, 2013: Status des Windenergieausbaus an Land Deutschland 2013, Varel, abrufbar unter:
http://www.windguard.de/fileadmin/media/pdfs/UEber_Uns/Statistik_Ausbau_Windenergie/Statistik_Gesamtjahr_2013/Fact_Sheet_Onshore_Statistik_Jahr_2013_final_korrigiert.pdf.
- Deutscher Bundestag*, 2013: Schlussbericht der Enquete-Kommission „Wachstum, Wohlstand, Lebensqualität – Wege zu nachhaltigem Wirtschaften und gesellschaftlichem Fortschritt in der Sozialen Marktwirtschaft“.
- Dias, Ana Cláudia/Arroja, Luís*, 2012: Environmental impacts of eucalypt and maritime pine wood production in Portugal, in: *Journal of Cleaner Production* 37, 368–376.
- Econum GmbH*, 2003: Graue Energie von Baustoffen,.
- Eickenbusch, Heinz/Krauss, Oliver*, 2014: Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau – Ressourceneffizienz und Technologien. 2. überarbeitete Auflage, Berlin, abrufbar unter:
http://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/2014-Kurzanalyse-03-VDI-ZRE-CFK.pdf.
- Ellenrieder, Gunther/Gänsicke, Thomas/Goede, Martin/Herrmann, Hans Georg*, 2013: Die Leichtbaustrategien, in: *Friedrich, Horst E. (Ed.)*, Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer Vieweg, 43–118.
- Exner, Andreas/Lauk, Christian/Schriebl, Ernst*, 2013: Energiewende-Ansätze und Ressourcenpolitiken in einer Ära zunehmender Knappheiten: Assessment und allgemeine Handlungsempfehlungen im Sinne des Gemeinwohls., Klagenfurt, Wien.
- Faulstich, Martin/Egner, Sebastian/Köglmeier, Markus*, 2012: Nachwachsende Rohstoffe : Nutzungsoptionen und Nutzungskonkurrenz, in: *ifo Schnelldienst* 65, 17–21.
- Ferretti, Johanna/Guske, Anna Lena/Jacob, Klaus/Quitow, Rainer*, 2012: Trade and the environment. Framework and methods for impact assessment., Berlin.
- Forum Nachhaltiges Bauen*, n.d.: Baustoffe Ökobilanz, abrufbar unter: <http://nachhaltiges-bauen.de/baustoffe/Bauholz>.
- Fraunhofer Gesellschaft*, n.d.: Energieeffizienz in der Produktion. Untersuchung zum Handlungs- und Forschungsbedarf, Fraunhofer Gesellschaft.
- Fraunhofer ISI*, 2012: Produkt-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030, Karlsruhe, abrufbar unter:
<http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/v/de/publikationen/PRM-LIB2030.pdf>.
- Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV*, n.d.: Recycling von EPS-Abfall zu re-expandierbarem Polystyrol, abrufbar unter:
<http://www.ivv.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/kunststoff-rezyklate/recycling-eps-abfall.html>, letzter Zugriff am 5.5.2014.
- Friedrich, Horst E./Krishnamoorthy, Sivakumara K*, 2013: Leichtbau als Treiber von Innovationen, in: *Friedrich, Horst E. (Ed.)*, Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer Vieweg.

- Frondel, Manuel/Ritter, Nolan/Vance, Colin*, 2012: Heterogeneity in the rebound effect: Further evidence for Germany, in: *Energy Economics* 34, 461–467, abrufbar unter: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988311002660>, letzter Zugriff am 30.4.2014.
- Gillingham, Kenneth/Kotchen, Matthew J./Rapson, David S./Wagner, Gernot*, 2013: Energy policy: The rebound effect is overplayed, in: *Nature* 493, 475–476.
- Goverse, Tessa/Hekkert, Marko P./Groenewegen, Peter/Worrell, Ernst/et al.*, 2001: Wood innovation in the residential construction sector; opportunities and constraints, in: *Resources, Conservation and Recycling* 34, 53–74.
- Graede, T. E./Harper, E. M./Nassar, N. T./Reck, Barbara K.*, 2013: On the materials basis of modern society, in: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, abrufbar unter: <http://www.pnas.org/content/early/2013/11/27/1312752110.full.pdf+html>.
- Gromke, Uli/Detzel, Andreas*, 2006: Ökologischer Vergleich von Büropapieren in Abhängigkeit vom Faserrohstoff, Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, August 2006, im Auftrag der „Initiative Pro Recyclingpapier“.
- Guske, Anna-Lena*, 2013: Kohärenzprüfung: Wirkungsketten, Kreuztabelle, iModeler (Projektpräsentation), in: Berlin.
- Hanke, Thomas/Soukup, Ole/Viebahn, Peter/Fischedick, Manfred*, 2010: Bottom-up Wirkungsanalyse-Modell. Abschlussbericht zu AS6.2, Wuppertal.
- Hermeling, Claudia/Wölfig, Nikolas*, 2011: Energiepolitische Aspekte der Bioenergienutzung: Nutzungskonkurrenz, Klimaschutz, politische Förderung, Mannheim, abrufbar unter: <http://bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/Studien/energiepolitische-aspekte-bioenergienutzung-endbericht,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>.
- Hertwich, E. G./Gibon, T./Bouman, E. A./Arvesen, A./et al.*, 2014: Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies, in: *Proceedings of the National Academy of Sciences*, abrufbar unter: <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1312753111>, letzter Zugriff am 7.10.2014.
- Heyn, Sören/Mettke, Angelika*, 2010: Ökologische Prozessbetrachtungen - RC-Beton (Stofffluss, Energieaufwand, Emissionen), zum Forschungsprojekt: Einsatz von Recycling-Material aus mineralischen Baustoffen Zuschlag in der Betonherstellung. Brandenburgische Technische Universität Cottbus.
- Holzbau-Magazin*, 2012: Focus: Turbo-Holzbau-Hochhaus, in: *Holzbau Magazin* 17, 6ff.
- Industrieverband Hartschaum*, 2014: IVH-Presseinformation 26.05.2014.
- Ingenieurbüro Floecksmühle/IHS Stuttgart/Hydrotec/Fichtner*, 2010: Potentialermittlung für den Ausbau der Wasserkraftnutzung in Deutschland. Kurzfassung, Aachen.

- International Energy Agency*, 2012: Energy Balances of OECD Countries 2012, Paris: OECD Publishing, abrufbar unter: http://www.oecd-ilibrary.org/energy/energy-balances-of-non-oecd-countries-2012_energy_bal_non-oecd-2012-en, letzter Zugriff am 1.2.2013.
- Jacob, Klaus/Münch, Lisa/Werland, Stefan*, 2014: Indikatoren der Ressourcenpolitik – Akteursanalyse von Interessen und Betroffenheit, Berlin, abrufbar unter: <http://www.ressourcenpolitik.de>.
- Jacob, Klaus/Werland, Stefan/Münch, Lisa*, 2013: Analyse der Debatten der Ressourceneffizienzpolitik in Deutschland: Erwartungen, Positionen und Konflikte der Ressourcenpolitik., Debattenanalyse im Projekt Ressourcenpolitik: Analyse der ressourcenpolitischen Debatte und Entwicklung von Politikoptionen (PolRess). www.ressourcenpolitik.de.
- Kienzeln, Volker/Erhorn, Hans/Krapmeier, Helmut/Lützkendorf, Thomas/et al.*, 2014: Über den Sinn von Wärmedämmung. Argumente zur Überwindung von Missverständnissen,, abrufbar unter: <http://www.klimaschutzagentur.org/downloads/PositionspapierberdenSinnvonWrmedmmung.pdf>.
- Kleijn, René/van der Voet, Ester/Kramer, Gert Jan/van Oers, Laurant/et al.*, 2011: Metal requirements of low-carbon power generation, in: *Energy* 36, 5640–5648, abrufbar unter: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544211004518>, letzter Zugriff am 30.9.2014.
- Kolb, Bernhard*, 2014: Polystyrol XPS - Ökobilanz, abrufbar unter: <http://nachhaltiges-bauen.de/baustoffe/PolystyrolXPS>.
- KrWG*, 2012: KrWG - Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen,, abrufbar unter: <http://www.gesetze-im-internet.de/krwg/>.
- Mantau, U.*, 2009: Holzrohstoffbilanz Deutschlands: Szenarien des Holzaufkommens und der Holzverwendung bis 2012, in: v.TI Landbauforschung Agriculture and Forestry Research Sonderheft 327, 27–36.
- Mantau, U.*, 2012: Holzrohstoffbilanz Deutschland. Entwicklungen und Szenarien des Holzaufkommens und der Holzverwendung von 1987 bis 2015, Zentrum Holzwirtschaft, Universität Hamburg.
- Mckinsey&Company*, 2008: Potenziale der öffentlichen Beschaffung für ökologische Industriepolitik und Klimaschutz,.
- Moss, Ray/Tzimas, Evangelos/Willis, Peter/Arendorf, Josie/et al.*, 2013: Critical Metals in the Path towards the Decarbonisation of the EU Energy Sector *JRC* (Ed.),, Luxembourg.
- Münch, Lisa/Jacob, Klaus*, 2013: Öffentliche Beschaffung zur Förderung der Ressourceneffizienz., Kurzanalyse 1 im Projekt Ressourcenpolitik: Analyse der ressourcenpolitischen Debatte und Entwicklung von Politikoptionen (PolRess).
- Norgate, Terry E.*, 2004: Metal Recycling: An Assessment Using Life Cycle Energy Consumption as a Sustainability Indicator.

- Ponitka, Jens/Lenz, Volker/Thrän, Daniela*, 2011: Energetische Holznutzung. Aktuelle Entwicklungen vor dem Hintergrund von Klima- und Ressourcenschutz, Forschungsreport 1/2011. Leipzig.
- Rademaker, J.H./Kleijn, R./Yongxiang Yang, Y.*, 2013: Recycling as a Strategy against Rare Earth Element Criticality: A Systemic Evaluation of the Potential Yield of NdFeB Magnet Recycling, in: *Environmental Science & Technology* 47, 10129–10136.
- Rettenmaier, Nils/Detzel, Andreas/Keller, Heiko/Kauertz, Benedikt/et al.*, 2014: Ökologische Innovationspolitik – Mehr Ressourceneffizienz und Klimaschutz durch nachhaltige stoffliche Nutzungen von Biomasse. Anlage: Lebenszyklusanalysen für ausgewählte bio-basierte Produkte Langfassung des AP 4-Berichts, IFEU- Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg im Auftrag des Umweltbundesamtes.
- Rohn, Holger/Pastewski, Nico/Lettenmeier, Michael*, 2010: Ressourceneffizienz von ausgewählten Technologien, Produkten und Strategien - Ergebniszusammenfassung der Potenzialanalysen, Wuppertal.
- Roskill Information Service*, 2007: The economics of rare earth and yttrium, London.
- Van de Sand, Isabel/Acosta-Fernández, José/Bringezu, Stefan*, 2007: Abschätzung von Potenzialen zur Verringerung des Ressourcenverbrauchs im Automobilsektor, „Steigerung der Ressourcenproduktivität als Kernstrategie einer nachhaltigen Entwicklung“ - Projekt im Auftrag des BMBF. Wuppertal.
- Sathre, Roger/Gustavsson, Leif*, 2009: Using wood products to mitigate climate change: External costs and structural change, in: *Applied Energy* 86, 251–257.
- Scholl, G./Gossen, M./Grubbe, M./Brumbauer, T*, 2013: Alternative Nutzungskonzepte – Sharing, Leasing und Wiederverwendung, Vertiefungsanalyse 1 im Projekt Ressourcenpolitik: Analyse der ressourcenpolitischen Debatte und Entwicklung von Politikoptionen (PolRess)., abrufbar unter: http://edocs.fu-berlin.de/docs/servlets/MCRFileNodeServlet/FUDOCSS_derivate_000000003550/PoLRess_AP2-Vertiefungsanalyse_alternativexNutzungskonzepte_FINAL.pdf.
- Scholl, Gerd*, 2012: Eine ressourcenleichte Konsumkultur - Nutzen statt besitzen, in: *Rohstoffquelle Abfall. Wie aus Müll die Produkte von morgen werden*. Oekom Verlag, 92–96.
- Schrode, Alexander/Burger, Andreas/Eckermann, Frauke/Berg, Holger/et al.*, 2010: Umweltschädliche Subventionen in Deutschland, Aktualisierte Ausgabe 2010. Umweltbundesamt, Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau, abrufbar unter: <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/4048.pdf>.
- Schroeder, Caterina*, 2013: Fraunhofer ISI : Lithium-Ressourcen frühestens 2050 erschöpft, in: *Automobiltechnische Zeitschrift - atzonline.de*, 2050, abrufbar unter: <http://www.springerprofessional.de/fraunhofer-isi-lithium-ressourcen-fruehestens-2050-erschoeppt-11159/3947246.html>.
- Schröter, Marcus/Lerch, Christian/Jäger, Angela*, 2011: Materialeffizienz in der Produktion: Einsparpotenziale und Verbreitung von Konzepten zur Materialeinsparung im Verarbeitenden

Gewerbe, Karlsruhe, abrufbar unter:

<http://www.demea.de/service/publikationen/20111207endberichtmaterialeffizienzinderproduktion.pdf>.

Schütz, Helmut/Bringezu, Stefan, 2008: Ressourcenverbrauch von Deutschland - aktuelle Kennzahlen und Begriffsbestimmungen., Dessau-Roßlau.

Schwarzkopp, Fritz/Drescher, Jochen/Gornig, Martin/Blazejczak, Jürgen, 2013: Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-und-Erden-Industrie bis 2030 in Deutschland,.

Siemens, 2013: Kreislauf statt Mülldeponie, abrufbar unter:

http://www.siemens.com/innovation/apps/pof_microsite/_pof-spring-2013/_html_de/neue-recyclingverfahren.html, letzter Zugriff am 5.5.2014.

Sprengard, Christoph/Treml, Sebastian/Holm, Andreas H., 2012: Technologien und Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe, München, abrufbar unter: <http://www.irbnet.de/daten/rswb/14069009548.pdf>.

SRU, 2013: Den Strommarkt der Zukunft gestalten. Sondergutachten, Berlin: Hausdruck.

Trechow, Peter/Pester, Wolfgang, 2011: Automobilhersteller nehmen Ökobilanz ins Visier, in:

ingenieur.de, abrufbar unter:

<http://www.ingenieur.de/Branchen/Fahrzeugbau/Automobilhersteller-nehmen-Oekobilanz-Visier>.

Umweltbundesamt, 2008: Bromierte Flammschutzmittel: Schutzengel mit schlechten Eigenschaften?, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt, 2013: Weltweites „Aus“ für Flammschutzmittel HBCD Verbot wirkt nach einem Jahr Übergangsfrist, abrufbar unter:

<http://www.umweltbundesamt.de/presse/presseinformationen/weltweites-aus-fuer-flammschutzmittel-hbcd>, letzter Zugriff am 5.5.2014.

Umweltbundesamt, 2014: Hexabromcyclododecan (HBCD). Antworten auf häufig gestellte Fragen., Dessau-Roßlau, abrufbar unter:

http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/faq_hbcd.pdf.

UNEP, 2013a: Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles. A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. *van der Voet, Ester/Salminen, Reijo/Eckelman, Matthew/Mudd, Gavin/et al.* (Eds.),,

UNEP, 2013b: Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure. A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel *van der Voet, Ester/Salminen, R./Eckelmann, M./Mudd, G./et al.* (Eds.),, Paris.

UNEP, 2014: Assessing Global Land Use: Balancing Consumption with Sustainable Supply. A Report of the Working Group on Land and Soils of the International Resource Panel. *Bringezu S., Schütz H., Pengue W., O'Brien M., Garcia F., Sims R., Howarth R., Kauppi L., Swilli Soil, International Resource Panel Working Group on Land and* (Ed.),,

- VDI ZRE, 2014: Ansätze zur Steigerung der Ressourceneffizienz im Automobilbau, Berlin, abrufbar unter:
http://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/2014-Kurzanalyse-VDI-ZRE-05-KFZ.pdf.
- VDI ZRE Website, n.d.: Wege zur Steigerung der Ressourceneffizienz, abrufbar unter:
<http://www.ressource-deutschland.de/home/was-ist-re/begriffsdefinition/>.
- Wäger, Patrick A./Lang, Daniel J., 2010: Seltene Metalle. Rohstoffe für Zukunftstechnologien, Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften. SATW Schrift Nr. 41.
- Wagner, Hermann-Josef/Baack, Christoph/Eickelkamp, Timo/Epe, Alexa/et al., 2010: Alpha Ventus – Kumulierter Energieaufwand und weitere Umweltindikatoren des Offshore-Windparks, in: BWK 62, 43–47.
- WECOBIS, n.d.: Dämmstoffe Produktgruppeninformation, abrufbar unter:
<http://www.wecobis.de/bauproduktgruppen/daemmstoffe.html>, letzter Zugriff am 5.5.2014.
- Werland, Stefan, 2012: Debattenanalyse Rohstoffknappheit, Berlin.
- Wirth, Harry, 2014: Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Stand: 10.1.2014, Freiburg: Fraunhofer ISE.
- Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, 2010: Umweltaspekte bei Stanz- und Biegeprozessen. Metallbearbeitung, Betrieblicher Umweltschutz in Baden-Württemberg.
- Woidasky, Jörg/Hirth, Thomas, 2012: Ressourceneffizienz von heute bis übermorgen, in: Chemie Ingenieur Technik 84, 969–976.
- Wolff, Franziska/Heyen, Dirk Arne/Jacob, Klaus/Guske, Anna-Lena, 2013: Zwischenbericht zum Vorhaben „Kohärenzprüfung umweltpolitischer Ziele und Maßnahmen für Zwecke der Umweltberichterstattung“ (unveröffentlicht), Berlin.
- Wuppertal Institut für Klima Umwelt Energie, 2014: Materialintensität von Materialien, Energieträgern, Transportleistungen, Lebensmitteln. Stand: 3. Februar 2014, abrufbar unter:
http://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/MIT_2014.pdf, letzter Zugriff am 5.5.2014.
- Zausig, Jörg, 2012: Auswirkungen von erneuerbaren Energien auf den Boden Bau und Betrieb von Windkraftanlagen – Auswirkungen auf Boden und Grundwasser,, abrufbar unter:
<http://www.lfu.bayern.de/boden/bodenschutztag/doc/15.pdf>.

Anhang

Abbildung 5: Darstellung der Wechselwirkungen zwischen den Ressourcentypen

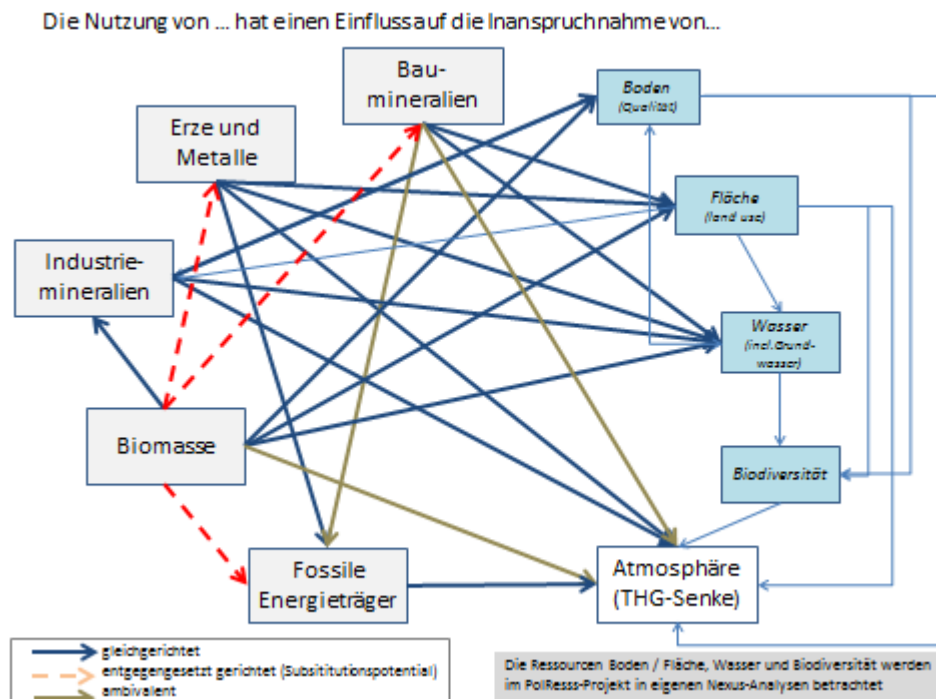
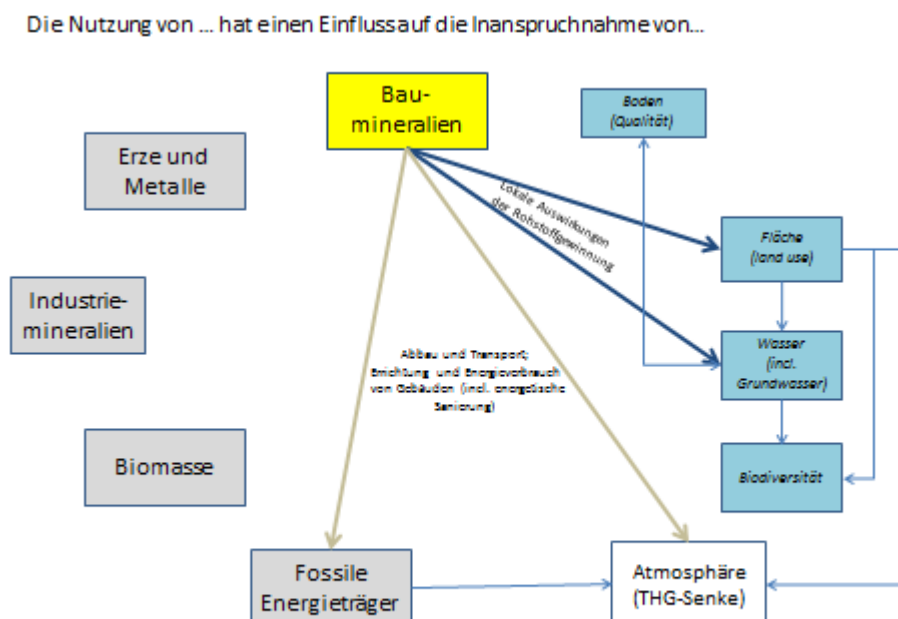
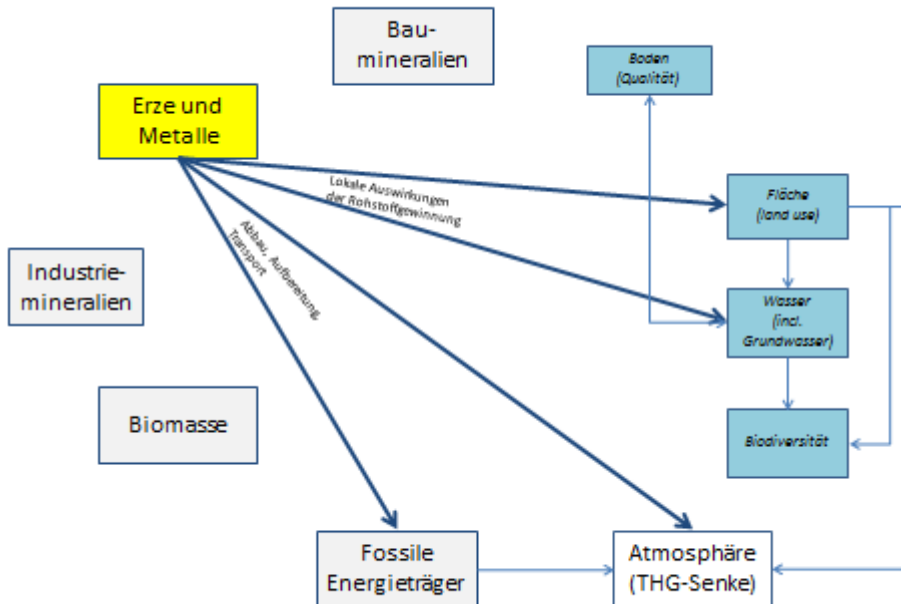


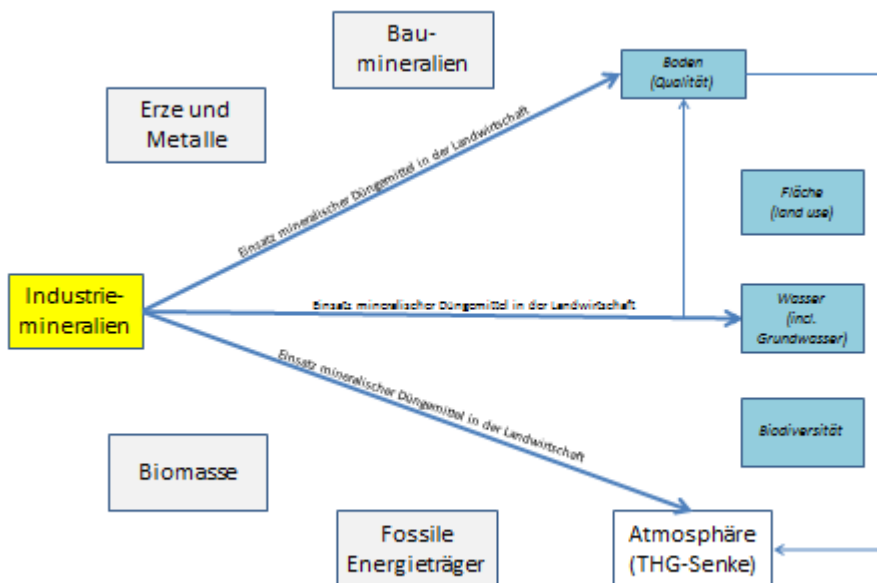
Abbildung 6: Darstellung der Wechselwirkungen zwischen den Ressourcentypen – ausgehend von Bau-mineralien



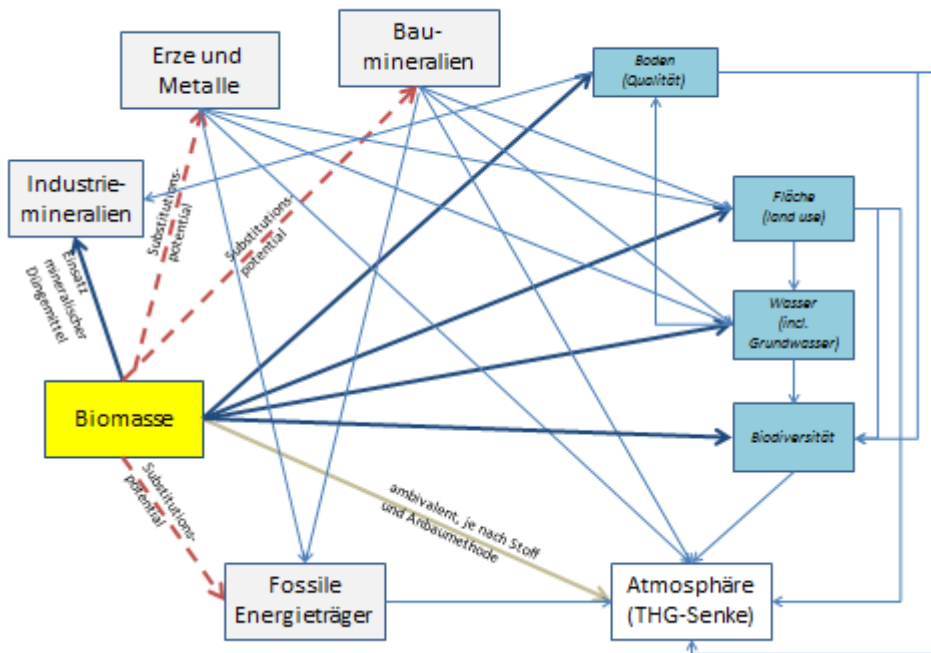
Die Nutzung von ... hat einen Einfluss auf die Inanspruchnahme von...



Die Nutzung von ... hat einen Einfluss auf die Inanspruchnahme von...



Die Nutzung von ... hat einen Einfluss auf die Inanspruchnahme von...



Die Nutzung von ... hat einen Einfluss auf die Inanspruchnahme von...

